

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE ESTAÇÕES DE METRO

Caso de Estudo: Metro do Porto

JORGE DAVID NASCIMENTO DA COSTA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais.
Ao meu irmão, Zé.

What worries you, masters you.
John Locke

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação, como elemento de conclusão do meu percurso académico, não estaria completa sem um agradecimento sentido a todos os que me ajudaram na sua realização:

Em primeiro lugar, um agradecimento especial ao Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela orientação, disponibilidade, apoio, paciência, motivação e exigência, não só durante a realização da tese, mas também durante as aulas de Acústica Ambiental e de Edifícios onde despertou em mim um grande gosto pela área.

Em segundo lugar ao Eng.º António Eduardo Costa, pelo auxílio na realização das medições, por toda a simpatia, disponibilidade e tranquilidade demonstradas, e pelas longas conversas de tópicos variados durante os ensaios.

Um agradecimento ao Metro do Porto, pela colaboração nesta dissertação, em especial a, Catarina Ferreira, à Eng.ª Ana Paula Gonçalves e ao Arq. Pedro Mouro, por toda a disponibilidade para esclarecer dúvidas e fornecer informações sobre o Caso de Estudo.

Ao meu Professor, Maestro, Colega e Amigo, Francisco Lima, por desde os meus 8 anos ser o maior responsável pelo meu grande amor pela música, tão importante para o meu grande gosto pela acústica.

A todos os meus amigos, principalmente aos que partilharam comigo este curso, por todas as gargalhadas, conversas, discussões, horas de estudo, almoços e futeboladas. Laços que se formaram rapidamente e que certamente ficarão para a vida.

Um especial agradecimento ao Manuel Aranha e ao António Gonçalves, pela amizade incondicional fortificada nos últimos anos de curso, pelos ótimos momentos, pelo apoio nas alturas difíceis, pelos desabafos mútuos, pela motivação e por tudo o que ainda iremos certamente experienciar.

Por último, agradeço às três pessoas mais importantes da minha vida. Ao meu irmão Zé, obrigado por ser um excelente exemplo que eu tive a sorte de poder seguir durante o meu crescimento e por seres o melhor irmão do mundo, continua a intensificar as nossas vidas. E um enorme obrigado aos meus pais, por me proporcionarem todos os meus estudos, pelo sacrifício, educação, carinho e amor. Todos os vossos gestos fizeram de mim o homem feliz que sou hoje.

RESUMO

As estações de metro são locais com grande tráfego de pessoas onde, para o seu conforto o ruído provocado metro tem de ser tido em conta e analisado de forma cuidada. Esta análise torna-se ainda mais importante no caso das estações subterrâneas, uma vez que são espaços fechados e reverberantes. Uma estação de metro subterrânea tem, à semelhança de estações de superfície, ruídos típicos, entre os quais: a partida e chegada do comboio, abertura e fecho de portas, ruído de fundo sem o comboio, ruído do comboio estacionário, assim como os sistemas sonoros de difusão de avisos ou de outros equipamentos (escadas rolantes, elevadores, etc.). Nestes espaços a especialidade de acústica deverá ter preocupações redobradas, por se tratarem de zonas confinadas onde os ruídos irão sofrer reflexões sucessivas e onde a atenuação geométrica será menor.

Esta dissertação faz um apanhado histórico sobre as estações de metro e a sua relação com a acústica de edifícios, fazendo referência às primeiras preocupações em controlar o som e à evolução de tratamentos e soluções para amenizar o ruído em zonas com elevado tráfego humano. Especial destaque é dado para as práticas e procedimentos a serem aplicadas em espaços subterrâneos.

Sendo as maiores preocupações acústicas o controlo dos níveis de ruído e assegurar a inteligibilidade dos avisos sonoros para todos os utilizadores, como caso de estudo, foram medidos parâmetros acústicos (Ruído de Fundo, RASTI e Tempo de Reverberação), para três estações do Metro do Porto, nomeadamente, as estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros.

Para o ruído de fundo os valores de L_{Aeq} medidos variam entre os 71,1 e os 84,0 dB, o valor médio do RASTI está entre 0,30 a 0,52 e o TR (500-2k Hz) varia entre os 3,25 e os 5,65 segundos.

Os resultados obtidos mostram que a estação com melhor comportamento acústico é a de Salgueiros, seguida de Faria Guimarães e Heroísmo, facto que se conclui estar ligado às diferentes áreas de tratamento acústico aplicadas nas estações. Os valores medidos permitem também avaliar o comportamento acústico das três estações em comparação com valores ótimos e com medições em estações de metro de outros locais.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Ruído de Fundo, *RASTI*, Tempo de Reverberação, Metro do Porto.

ABSTRACT

Subway stations are places with great traffic of people, where, for their comfort the noise caused by the carriages must be taken into account and analyzed in a careful way. This analysis becomes even more important in the case of underground stations, since they are enclosed and reverberant spaces. An underground subway station has, like the surface stations, typical noises, among which: the departure and arrival of the train, opening and closing of doors, background noise without the train, noise of the stationary train, as well as the public announcements systems or other equipment. In these spaces the specialty of acoustics should have doubled concerns, because they are confined areas where noises will undergo successive reflections and where the geometric attenuation will be smaller.

This dissertation takes a historical look at the metro stations and their relationship with building acoustics, referring to the first concerns in controlling the sound and the evolution of treatments and solutions to reduce noise in areas with high human traffic. Special emphasis is given to the practices and procedures to be applied in underground spaces.

As a case study, acoustic parameters (Background Noise, RASTI and Reverberation Time) were measured in three stations of “Metro do Porto”, namely, the stations of Faria Guimarães, Heroísmo and Salgueiros.

For the background noise, the values of L_{Aeq} measured vary between 71,1 and 84,0 dB, the mean value for the RASTI ranges from 0,30 to 0,52 and the RT (500-2k Hz) vary between 3,25 and 5,65 seconds.

The results show that the station with the best acoustic behavior is Salgueiros, followed by Faria Guimarães and Heroísmo, which is concluded to be connected to the different areas of acoustic treatment applied in the stations. The measured values also allow to evaluate the acoustic behavior of the three stations in comparison with optimal values and with values present in metro stations in other cities.

KEYWORDS: Acoustics, Background Noise, RASTI, Reverberation Time, Metro do Porto.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE QUADROS	xiii
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	xvii

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVO	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	2

2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. SOM	3
2.2. PRESSÃO	3
2.3. FREQUÊNCIA	4
2.4. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA	4
2.5. NÍVEL SONORO	5
2.6. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA CONTÍNUA EQUIVALENTE	6
2.7. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA ESTATÍSTICOS	6
2.8. REFLEXÃO SONORA	6
2.9. ABSORÇÃO SONORA	8
2.9.1. ABSORÇÃO SONORA	8
2.9.2. MATERIAIS E SISTEMAS	8
2.10. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	9
2.11. RUÍDO DE FUNDO	11
2.12. RASTI	11
2.13. AC	11
2.14. SIL	12

3. ACÚSTICA DE ESTAÇÕES DE METRO

3.1. ESTAÇÕES DE METRO	13
3.1.1. DEFINIÇÃO	13
3.1.2. PRIMEIRAS LINHAS DE METRO	13
3.1.3. ESTAÇÕES DE METRO E OS SEUS UTILIZADORES	15
3.2. ACÚSTICA DE ESTAÇÕES DE METRO	16
3.2.1. ACÚSTICA	16

3.2.2. PRIMEIRAS INTERVENÇÕES ACÚSTICAS EM ESTAÇÕES DE METRO	18
3.2.3. AVANÇOS NO TRATAMENTO E DIMENSIONAMENTO ACÚSTICO DE ESTAÇÕES DE METRO	25
4. CASO DE ESTUDO	37
4.1. METRO DO PORTO	37
4.2. ESTAÇÕES ANALISADAS	38
4.2.1. CRITÉRIOS DE ESCOLHA.....	38
4.2.2. ESTAÇÃO DE FARIA GUIMARÃES	39
4.2.3. ESTAÇÃO DO HEROÍSMO	41
4.2.4. SALGUEIROS	43
5. METODOLOGIA	47
5.1. PARÂMETROS DE ANÁLISE	47
5.1.1. RASTI	47
5.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	47
5.1.3. RUÍDO DE FUNDO.....	48
5.2. REQUISITOS LEGISLATIVOS	48
5.3. EQUIPAMENTOS	49
5.4. MÉTODO DE ANÁLISE.....	51
5.4.1. CALENDARIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES	51
5.4.2. MEDIÇÃO DO RUÍDO DE FUNDO	52
5.4.3. MEDIÇÃO DO RASTI	55
5.4.4. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	58
5.4.5. RESUMO DA METODOLOGIA.....	61
6. RESULTADOS	63
6.1. APRESENTAÇÃO, COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
6.1.1. RUÍDO DE FUNDO.....	63
6.1.2. RASTI	70
6.1.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	76
6.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	82
6.3. CUMPRIMENTO DA REGULAMENTAÇÃO - R.R.A.E.	85
6.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM OUTRAS ESTAÇÕES	87
7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	93
7.1. CONCLUSÕES	93
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Reflexão de ondas de energia sonora ao incidir numa superfície plana [2].....	7
Fig. 2.2 - Reflexão de um raio de energia sonora ao incidir numa superfície plana ($\theta_i = \theta_r$) [2]	7
Fig. 2.3 - Curvas de decaimento para medição do tempo de reverberação. No caso A, o ruído de fundo apresenta um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que seja detetável a redução de 60 dB no nível de pressão sonora do ruído de teste. No caso B o ruído de fundo não tem um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que essa redução seja detetável, pelo que se faz uma extrapolação para os 60 dB a partir da redução medida. [2]	9
Fig. 3.1 - Primeira linha de comboio subterrâneo em Londres (1863) [5].....	14
Fig. 3.2 - Estação <i>Gare du Nord</i> da linha 5 do metro de Paris, França [10].....	16
Fig. 3.3 - Wallace Clement Sabine, Físico, Professor em Harvard e “Pai” da Acústica de Edifícios [13]	17
Fig. 3.4 –Carruagem PCC (<i>Presidents’ Conference Committe</i>) utilizada mundialmente [20]	22
Fig. 3.5 - Comparação dos Níveis de Pressão Sonora simulados e medidos, quando as carruagens estão a entrar da estação de <i>Xingzhong Road</i> do metro de Xangai [adaptado de 44]	30
Fig. 3.6 – Comparação dos Níveis de Pressão Sonora simulados e medidos, quando as carruagens estão a sair da estação de <i>Xingzhong Road</i> do metro de Xangai [adaptado de 44].....	30
Fig. 3.7 - Comparação dos Níveis de Pressão Sonora simulados antes e depois do tratamento para a estação de <i>Xingzhong Road</i> do metro de Xangai [adaptado de 44]	31
Fig. 4.1 - Mapa da rede do Metro do Porto sinalizando a localização das estações escolhidas para análise [47]	39
Fig. 4.2 – Entrada da estação Faria Guimarães (Porto) [foto do autor].....	40
Fig. 4.3 - Plataforma de embarque da estação Faria Guimarães (Porto) [foto do autor]	40
Fig. 4.4 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães (dimensões em metros)	41
Fig. 4.5 – Corte esquemático da plataforma da estação Faria Guimarães indicando os valores dos pés-direitos (dimensões em metros)	41
Fig. 4.6 - Entrada da estação Heroísmo (Porto) [foto do autor].....	42
Fig. 4.7 - Plataforma de embarque da estação Heroísmo (Porto) [foto do autor].....	42
Fig. 4.8 - Planta da plataforma da estação Heroísmo (dimensões em metros)	43
Fig. 4.9 - Corte esquemático da plataforma da estação Heroísmo indicando os valores dos pés-direitos (dimensões em metros).....	43
Fig. 4.10 - Entrada da estação Salgueiros (Porto) [foto do autor]	44

Fig. 4.11 - Plataforma de embarque da estação Salgueiros (vista da claraboia) [foto do autor].....	44
Fig. 4.12 - Plataforma de embarque da estação de Salgueiros (Porto) (com zona em acrílico) [foto do autor]	45
Fig. 4.13 - Planta da plataforma da estação de Salgueiros (dimensões em metros).....	45
Fig. 4.14 – Corte esquemático da plataforma da estação de Salgueiros indicando os valores dos pés-direitos (dimensões em metros)	45
Fig. 5.1 – Pormenor do emissor (esquerda) e do recetor (direita) do RASTI [fotos do autor]	50
Fig. 5.2 - Fonte sonora e recetor do RASTI [foto do autor].....	50
Fig. 5.3 - Fonte sonora e sonómetro para a medição do tempo de reverberação [foto do autor]	50
Fig. 5.4 - Sonómetro (esquerda) e fonte sonora (direita) [fotos do autor].....	51
Fig. 5.5 - Sonómetro para a medição do ruído de fundo [foto do autor]	51
Fig. 5.6 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães com sinalização dos dois pontos utilizados para a medição do ruído de fundo (dimensões em metros)	53
Fig. 5.7 - Planta da plataforma da estação Heroísmo com sinalização dos dois pontos utilizados para a medição do ruído de fundo (dimensões em metros).....	54
Fig. 5.8 - Medição do ruído de fundo na estação Heroísmo (zona de transição entre acesso às escadas e a plataforma) [foto pelo autor]	54
Fig. 5.9 - Planta da plataforma da estação Salgueiros com sinalização dos dois pontos utilizados para a medição do ruído de fundo (dimensões em metros)	55
Fig. 5.10 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do RASTI (dimensões em metros).....	56
Fig. 5.11 - Medição do parâmetro RASTI na plataforma de embarque da estação de metro Faria Guimarães [foto pelo autor].....	57
Fig. 5.12 - Planta da plataforma da estação Heroísmo com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do RASTI (dimensões em metros).....	57
Fig. 5.13 - Planta da plataforma da estação Salgueiros com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do RASTI (dimensões em metros).....	58
Fig. 5.14 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do Tempo de Reverberação (dimensões em metros)	59
Fig. 5.15 - Medição do Tempo de Reverberação na plataforma de embarque da estação Faria Guimarães [foto pelo autor].....	60
Fig. 5.16 - Planta da plataforma da estação Heroísmo com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do Tempo de Reverberação (dimensões em metros).....	60
Fig. 5.17 - Planta da plataforma da estação Salgueiros com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do Tempo de Reverberação (dimensões em metros).....	61

Fig. 6.1 - Valores do Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}) para os três casos de medição do ruído de fundo na estação Faria Guimarães (1s – pt.1 sem comboio; 1c – pt.1 com comboio; 2s – pt.2 sem comboio)	63
Fig. 6.2 - Valores do Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}) para os quatro casos de medição do ruído de fundo na estação Heroísmo (1s – pt.1 sem comboio; 1c ⁺ - Ponto 1 com comboio na linha + próxima; 1c ⁻ - Ponto 1 com comboio na linha - próxima; 2s – pt.2 sem comboio)	65
Fig. 6.3 - Valores do Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}) para os quatro casos de medição do ruído de fundo na estação Salgueiros (1s – pt.1 sem comboio; 1c – pt.1 com comboio; 1c ₂ – pt.1 com dois comboios; 2s – pt.2 sem comboio)	66
Fig. 6.4 - Valores do L_{Aeq} para cada estação agrupados por ponto de medição	68
Fig. 6.5 - Valores do L_{A5} para cada estação agrupados por ponto de medição	68
Fig. 6.6 - Valores do L_{A50} para cada estação agrupados por ponto de medição	68
Fig. 6.7 - Valores do L_{A95} para cada estação agrupados por ponto de medição	69
Fig. 6.8 - Valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Faria Guimarães	70
Fig. 6.9 - Valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Heroísmo	72
Fig. 6.10 - Valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Salgueiros	73
Fig. 6.11 - Média dos valores de RASTI de cada par de pontos (junto à linha e junto à parede) para as três estações em estudo (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)	74
Fig. 6.12 - Média geral para cada estação (8 posições) das medições do RASTI	75
Fig. 6.13 - Média junto à linha para cada estação (4 posições) das medições do RASTI	75
Fig. 6.14 - Média junto à parede para cada estação (4 posições) das medições do RASTI	75
Fig. 6.15 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de 1/3 de oitava, para as oito medições na estação Faria Guimarães	76
Fig. 6.16 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de 1/3 de oitava, para as oito medições na estação Heroísmo	77
Fig. 6.17 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de 1/3 de oitava, para as oito medições na estação Salgueiros	79
Fig. 6.18 – Média dos valores do Tempo de Reverberação das oito medições de cada estação por banda de 1/3 de oitava (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)	80
Fig. 6.19 - Tempo de Reverberação Médio (400-2500 Hz) de cada estação	81
Fig. 6.20 - Modelo 3D para cálculo do volume da estação Faria Guimarães	82
Fig. 6.21 - Modelo 3D para cálculo do volume da estação Heroísmo	82
Fig. 6.22 - Modelo 3D para cálculo do volume da estação Salgueiros	83
Fig. 6.23 - Relação entre o TR médio (400-2500 Hz) e as áreas de teto acústico para as três estações	84

Fig. 6.24 - Relação entre o TR médio (400-2500 Hz) e o rácio das áreas de teto acústico sobre as áreas de teto não tratado, para as três estações (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)..... 85

Fig. 6.25 - Comparação de valores de L_{Aeq} (durante a passagem de comboio) de outras estações com os valores medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros 87

Fig. 7.1 - Relação entre o TR médio (400-2500 Hz) e as áreas de teto acústico para as três estações95

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Valores numéricos das ponderações da curva A para as bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de.....	5
Quadro 2.2 - Valores ideais para os tempos de reverberação médios (500/1k Hz) dos espaços, de acordo com a sua utilização. [1].....	11
Quadro 2.3 - Valores para método de obtenção do parâmetro AC [1]	12
Quadro 2. 4 - SIL (dB) para o qual a comunicação é, no limite, possível. (M: Masculino; F: Feminino) [1]	12
Quadro 3.1 - Primeiras 20 cidades a serem servidas de Metropolitano [6].....	15
Quadro 3.2- Níveis de Pressão Sonora Médios para diferentes tipos de carruagens do sistema de trânsito de Nova Iorque, a circular em linhas de ambiente aberto e operando a uma velocidade de 64 km/h [adaptado de 14].....	19
Quadro 3.3 – Comparação entre os valores medidos para estruturas elevadas e para estruturas subterrâneas do sistema de trânsito de Nova Iorque, para o mesmo tipo de comboio (Tipo A – <i>Old type, single shell, steel car</i>) [adaptado de 14].....	19
Quadro 3.4 – Valores de nível pressão sonora (dB) medidos dentro e fora das carruagens de linhas elevadas e subterrâneas do sistema de trânsito de Chicago, para espectro completo de frequência e entre os 400-800 Hz [adaptado de 15].....	20
Quadro 3.5 - Nível de interferência na conversação (SIL - <i>speech interference level</i>) médio nas carruagens de superfície e subterrâneas de Toronto [adaptado de 16].....	21
Quadro 3.6 – Níveis Sonoros das pás de ventilação medidos antes e depois do tratamento numa estação da <i>Bay Area Rapid Transit System</i> (São Francisco) [adaptado de 22].....	23
Quadro 3.7 – Tempos de Reverberação para várias bandas de oitava [125-8k Hz] na plataforma de uma estação da <i>Bay Area Rapid Transit System</i> (São Francisco) antes e depois do tratamento [adaptado de 22]	24
Quadro 3.8 – Comparação dos 5 s de nível sonoro máximo entre plataformas subterrâneas, carruagens subterrâneas e paragens de autocarro do sistema de trânsito de Nova Iorque [adaptado de 24].....	24
Quadro 3.9 - Valores de nível de pressão sonora e STI para a estação de <i>St. John's Wood</i> (Londres) [adaptado de 30, 31]	26
Quadro 3.10 - Valores previstos para o tempo de reverberação por banda de oitava para as estações <i>Sogutozu, Bilkent</i> e <i>ODTU</i> do metro de Ancara [adaptado de 37]	27
Quadro 3.11 - Valores previstos para o nível de pressão sonora nas estações <i>Sogutozu, Bilkent</i> e <i>ODTU</i> do metro de Ancara [adaptado de 37].....	28
Quadro 3.12 - Valores de STI previstos para a estação de <i>Kungsträdgården</i> (Estocolmo) através dos <i>softwares</i> de modelação acústica CATT-A e ODEON [adaptado de 41].....	29
Quadro 3.13 - Valores de STIPA (<i>Speech Transmission Index for Public Address Systems</i>) medidos para 17 estações do Sistema de Transporte Público de Estocolmo [adaptado de 41]	29

Quadro 3.14 - Resumo comparativo de valores de Ruído de Fundo para estações de vários países	32
Quadro 3.15 - Resumo comparativo de valores de parâmetros de inteligibilidade da palavra para estações de vários países [16, 30, 37, 41, 45].....	34
Quadro 3.16 - Resumo comparativo de valores de Tempo de Reverberação para estações de vários países	35
Quadro 5.1 - Resumo dos pontos de medição para os três parâmetros analisados e para as três estações	61
Quadro 5.2 - Resumo dos tempos de medição ou número de medições para os três parâmetros analisados e para as três estações.....	61
Quadro 6.1 - Níveis sonoros estatísticos para os três casos de medição do ruído de fundo na estação Faria Guimarães	64
Quadro 6.2 - Níveis sonoros estatísticos (L_{AN}) para os três casos de medição do ruído de fundo na estação Heroísmo	65
Quadro 6.3 - Níveis sonoros estatísticos (L_{AN}) para os quatro casos de medição do ruído de fundo na estação Salgueiros.....	66
Quadro 6.4 - Valores dos ΔL máximos entre estações calculados para os quatro parâmetros medidos (L_{Aeq} , LA_5 , LA_{50} e LA_{95}) e para cada ponto de medição (1s – pt.1 sem comboio; 1c – pt.1 com comboio; 2s – pt.2 sem comboio)	69
Quadro 6.5 - Descrição qualitativa da inteligibilidade da palavra de acordo com os valores de RASTI [54].....	70
Quadro 6.6 – Tabela resumo dos valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Faria Guimarães com as respetivas médias por par de pontos, por zona e média geral da estação	71
Quadro 6.7 - Tabela Resumo dos valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Heroísmo com as respetivas médias por par de pontos, por zona e média geral da estação	72
Quadro 6.8 - Tabela Resumo dos valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Salgueiros com as respetivas médias por par de pontos, por zona e média geral da estação	73
Quadro 6.9 - Valores de Tempo de Reverberação por bandas de 1/3 de oitava, média e desvio padrão, para as oito medições efetuadas na estação Faria Guimarães.....	76
Quadro 6.10 - Valores de Tempo de Reverberação por bandas de 1/3 de oitava, média e desvio padrão, para as oito medições efetuadas na estação Heroísmo	78
Quadro 6.11 - Valores de Tempo de Reverberação por bandas de 1/3 de oitava, média e desvio padrão, para as oito medições efetuadas na estação Salgueiros	79
Quadro 6.12 - Tabela resumo dos valores médios do RASTI e do Tempo de Reverberação para as três estações em estudo	81
Quadro 6.13 – Classificação comparativa das diferentes estações em função do parâmetro analisado	82
Quadro 6.14 - Volumes de ar para as três estações em estudo	83
Quadro 6.15 – Área de teto acústico aplicado nas três estações em estudo [adaptado de 56]	83

Quadro 6.16 – Áreas de teto não tratado, áreas de teto acústico, rácio entre as áreas para análise da relação com o TR médio (400-2500 Hz)	84
Quadro 6.17 - Valores do volume interior, do tempo de reverberação regulamentar máximo obtido pela equação $T_{500Hz - 2000Hz} \leq 0,12V^{1/3}$ e do fator I (25% do TR regulamentar) para as três estações em estudo.....	86
Quadro 6.18 – Comparação, para as três estações, dos valores do tempo de reverberação regulamentar com o tempo de reverberação medido <i>in situ</i> e corrigido do fator I (25% TR máx. regulamentar)	86
Quadro 6.19 - Comparação de valores de Ruído de Fundo de vários países com os valores medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros	89
Quadro 6.20 - Comparação de valores de parâmetros de inteligibilidade para estações de vários países com os valores de RASTI das estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros	91
Quadro 6.21 - Comparação de valores de Tempo de Reverberação para estações de vários países com os valores de TR medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros	92
Quadro 7.1 - Tabela resumo das medições efetuadas nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros para os parâmetros acústicos TR, RASTI e Ruído de Fundo	94

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α	– Coeficiente de absorção sonora teórico
Δ	– Diferença aritmética entre valores numéricos
λ	– Comprimento de onda [m]
θ	– Temperatura do ar [°C]
θ_i	– Ângulo de incidência
θ_r	– Ângulo de reflexão
A	– Superfície de absorção sonora equivalente total [m ²]
AC	– <i>Articulation Class</i> (Classe de articulação)
ACE	– Agrupamento complementar de empresas
BART	– <i>Bay Area Rapid Transit</i>
c	– Celeridade [m/s]
dB	– Decibel (unidade de medida)
D50	– Definição [dB]
EDT	– <i>Early Decay Time</i> (Tempo de decaimento curto) [s]
FG	– Estação de Faria Guimarães
F	- Feminino
f	– Frequência [Hz]
f_0	– Frequência central de banda [Hz]
f_1	– Frequência limite inferior de banda [Hz]
f_2	– Frequência limite superior de banda [Hz]
Freq.	– Frequência
H	– Estação de Heroísmo
L_A	– Nível sonoro, ponderado A [dB]
L_{Aeq}	– Nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A [dB]
L_{eq}	– Nível de pressão sonora contínuo equivalente [dB]
m	– Absorção sonora do ar [m ⁻¹]
M	– Masculino

nc – Nível de conversação

p – Pressão sonora [Pa]

p_{ef} – pressão eficaz [Pa]

p_0 – Pressão sonora de referência [Pa]

RASTI – *Rapid Speech Transmission Index*

RF – Ruído de Fundo

RRAE – Regulamento de Requisitos Acústicos de Edifícios

S – Estação de Salgueiros

S_i – Área da superfície do material i [m^2]

SIL – Speech Interference Level

STCP – Sociedade de Transportes Coletivos do Porto

STI – *Speech Transmission Index*

STIPA – *Speech Transmission Index for Public Announcements*

T – Período [s]

TR – Tempo de reverberação [s]

$TR_{\text{médio}}$ (500-2k Hz) – Tempo de reverberação médio nas frequências 500, 1k e 2k Hz

TR_{30} – Tempo de reverberação determinado por um decaimento de 30 dB [s]

V – Volume (m^3)

1s – Ponto 1 sem comboio

1c – Ponto 1 com comboio

1c2 – Ponto 1 com dois comboios

2s – Ponto 2 sem comboio

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVO

O ser humano procura de forma constante e instintiva o conforto. No âmbito dos edifícios, o Homem tem cada vez mais preocupações com a qualidade térmica dos edifícios, com a organização dos espaços, com a sua iluminação, com a sensação satisfatória de uma arquitetura apelativa e até com o sentido de segurança. Todos estes fatores geram conforto e bem-estar, e são prioridade na projeção de novos edifícios. No entanto é crescente a preocupação com a acústica dos edifícios, responsável pelo conforto auditivo. Muitas vezes ignorado por não ser um problema evidente ou de fácil resolução, o mau comportamento acústico de um espaço pode ser a razão pela qual os utilizadores deixam de o frequentar. Quer seja uma sala de espetáculos que “seca” o som de uma orquestra, ou um teatro onde não se entende o diálogo dos atores ou até uma biblioteca demasiado ruidosa, espaços como estes, em que a acústica está desajustada, serão apelidados pelos utilizadores como “má sala de espetáculos”, “mau teatro” e “má biblioteca”, por muito boas que sejam todas as outras especialidades e arquitetura.

Tendo em mente a grande importância da acústica dos edifícios e conhecendo a ciência associada, é possível criar e reabilitar espaços que cumpram as necessidades acústicas da sua finalidade. Porém, existem espaços mais exigentes em que o tratamento acústico é fundamental, como é o caso das estações de metro subterrâneas. As estações de metro são locais expostos a grandes quantidades de ruído e para além do conforto dos passageiros, o ruído excessivo pode ser, nos casos mais extremos, perigoso para a saúde dos utilizadores e trabalhadores das estações.

As grandes preocupações acústicas nas estações de metro subterrâneas são: a diminuição do ruído da passagem dos comboios, pois são as passagens de veículos que geram o ruído mais elevado, capaz de causar grande desconforto e fomentar problemas de saúde nos utilizadores e trabalhadores; permitir a inteligibilidade da palavra nas conversas, porque apesar do sistema de metro ser um serviço de transporte, o seu carácter público torna-o também um espaço social e de convívio; e assegurar a inteligibilidade da palavra para os sistemas públicos de difusão de mensagens sonoras, que são essenciais para a transmissão das informações de chegada e partida dos comboios e fundamentais na transmissão de indicações de segurança em casos de emergência.

O objetivo desta dissertação é o estudo e caracterização acústica das estações de metro subterrâneas, recolhendo informação de vários estudos já efetuados, expondo a evolução das técnicas de análise que têm vindo a ser desenvolvidas e analisando o caso de estudo deste trabalho, o Metro do Porto. São efetuadas medições de parâmetros acústicos (Ruído de Fundo, RASTI e Tempo de Reverberação), para três estações do sistema de metro da cidade do Porto, nomeadamente, as estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros.

As medições *in situ* dos parâmetros acústicos nestas três estações e a posterior análise e comparação dos resultados permitem tirar conclusões sobre o comportamento acústico das estações, assim como compará-lo a estações de outros países.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

Esta dissertação está dividida em sete capítulos:

O primeiro capítulo, *Introdução*, apresenta e enquadra o tema de estudo, expõe as motivações e os objetivos deste trabalho, assim como a sua estruturação.

O segundo capítulo, *Conceitos e Definições*, fornece conceitos base da acústica assim como alguns conceitos específicos da acústica ambiental e de edifícios necessários para o bom entendimento das temáticas abordadas nesta dissertação.

O terceiro capítulo, *Acústica de Estações de Metro*, faz o apanhado histórico e científico dos assuntos que se relacionam com a acústica de estações de metro. Começando com as primeiras linhas de metro, passando pela evolução da acústica como ciência e culminando nas intervenções e desenvolvimentos da acústica aplicada em estações de metro.

O quarto capítulo, *Caso de Estudo*, apresenta o Metro do Porto como caso de estudo, sendo feita uma breve descrição da história e do funcionamento do sistema de metro da cidade do Porto. São também descritas as três estações que serão alvo de análise: Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros.

O quinto capítulo, *Metodologia*, enumera os parâmetros que serão medidos nas estações, menciona os equipamentos utilizados e descreve a metodologia utilizada para a medição nas estações do Metro do Porto.

O sexto capítulo, *Resultados*, expõe os valores obtidos da análise dos parâmetros acústicos, fazendo a comparação destes valores entre as estações em estudo e com valores de estudos em outras estações.

O sétimo e último capítulo, *Conclusões e Desenvolvimentos Futuros*, analisa os resultados obtidos e retira as considerações finais desta dissertação. Neste capítulo são também feitas considerações para futuras abordagens e possíveis trabalhos a realizar dentro deste tema.

2

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1. SOM

O som é passível de ser descrito como um estímulo cerebral devido à captação, por um sistema auditivo, de variações de pressão que se propagam num meio elástico, frequentemente (e no contexto desta dissertação) o ar. Assim sendo, o som apenas existirá se no momento da alteração de pressão num determinado ponto, houver um ser vivo com sistema auditivo capaz de captar e interpretar essa variação de pressão no meio. O facto de a existência de som depender da presença de um sistema auditivo que o decifre, apoia o carácter subjetivo que qualquer som tem, pois, dependendo do ouvinte e das circunstâncias em que se encontra, este pode considerar a alteração de pressão como ruído e não como som. Deste modo, a mesma variação de pressão em propagação no ar pode ser interpretada como som para um certo indivíduo, por ser agradável ou com significado, ao mesmo tempo que é interpretada como ruído para outro indivíduo, por ser desagradável ou sem significado.

Nos casos mais frequentes, a propagação do som dá-se no ar sob a forma de ondas esféricas e concêntricas, tendo como centro a fonte sonora (fonte pontual). O centro da fonte sonora corresponde ao ponto onde ocorre a variação de pressão face à pressão atmosférica. Noutros casos a origem sonora pode ter prolongamento linear (fonte linear). [1]

2.2. PRESSÃO

Um som ou ruído existe devido à variação da pressão no meio de propagação das ondas sonoras (ar no contexto desta dissertação). Essa variação de pressão é difundida pela colisão sucessiva das partículas de ar entre si, não existindo deslocamento permanente das mesmas, podendo a propagação ser representada por uma série de compressões e rarefações do meio. Na medição da variação de pressão provocada pelas ondas sonoras deve ter-se em conta como situação de referência a pressão atmosférica normal, que no nosso planeta ronda os 101.400 Pa. São as pequenas variações de pressão em torno do valor de pressão atmosférica que o sistema auditivo consegue captar. A velocidade da propagação da variação de pressão no ar (celeridade, em m/s) é função da temperatura e é dada pela expressão (2.1) [1]

$$c = 20,045 \sqrt{273,15 + \theta} \quad (2.1)$$

A variação de pressão é uma variável acústica que tem alterações temporais assinaláveis. Assim, a variação de pressão é normalmente determinada pela medição de valores eficazes. Essa pressão eficaz,

também denominada de pressão RMS (*root mean square*), é aquela que interessa avaliar e é a mesma que os sonómetros determinam. A pressão eficaz é definida pela expressão (2.2) [1].

$$p_{ef}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (2.2)$$

Para sons puros, sons constituídos por uma só frequência, a expressão pode ser simplificada, relacionando a pressão eficaz com a pressão máxima com a expressão (2.3) [1].

$$p_{eficaz} = \frac{p_{máxima}}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

2.3. FREQUÊNCIA

A frequência é uma grandeza importante para descrever um sinal sonoro. Quase todos os sons ou ruídos contêm diferentes frequências, uns com predominância de frequências mais baixas, outros com predominância de frequências mais altas. A frequência é uma grandeza medida em *hertz* (Hz) e representa o número de ciclos completos por segundo, ou seja, a taxa de ocorrência das flutuações completas de pressão por segundo. A frequência relaciona-se com o comprimento de onda e com o período de acordo com a expressão (2.4), onde λ é o comprimento de onda (m), c é a velocidade de propagação da onda, T é o período (s) e f é a frequência (Hz).

$$\lambda = c \times T = \frac{c}{f} \quad (2.4)$$

Também é necessário entender o conceito de banda de frequência. Uma banda de frequência corresponde a um conjunto de frequências que se inserem num dado intervalo delimitado inferiormente por uma frequência dita f_1 e superiormente por uma frequência f_2 . O valor da frequência central é representado por f_0 . A diferença entre os valores do limite superior e inferior corresponde à largura da banda que, na acústica ambiental e de edifícios, pode ser de 1/1 oitava ou de 1/3 de oitava. Usar bandas de frequências é vantajoso na medida em que seria extremamente trabalhoso fazer uma análise detalhada por cada uma das centenas ou milhares de frequências. Assim a análise é feita por bandas, facilitando a análise. Os intervalos de uma oitava normalizados no domínio do audível são aqueles centrados em: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz, que correspondem aproximadamente aos valores f_0 de cada uma das bandas, sendo, portanto, estas as frequências nominais de cada uma dessas mesmas bandas. Do mesmo modo, os intervalos de terço de oitava normalizados no domínio do audível são aqueles centrados em: 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000, 5.000, 6.300, 8.000, 10.000, 12.500, 16.000 e 20.000 Hz [1].

2.4. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

O limiar da audição humana é de 10^{-5} Pa de variação de pressão (valor mínimo) enquanto o limiar da dor é cerca de 100 Pa de variação de pressão (valor máximo). Deste modo, no domínio da pressão, a gama da audibilidade humana tem uma ordem de grandeza de 10^7 [1]. Como consequência desta grande diferença entre valores extremos, a aplicação duma escala linear em pascal na medição das pressões sonoras é desapropriada. Isto, aliado ao facto de que o ouvido responde aos estímulos de forma quase logarítmica, leva a que se utilize o decibel (dB) para avaliar as variações de pressão. Assim, avalia-se o nível de pressão sonora (em dB) face a um valor de referência. Esse valor de referência é designado por pressão sonora de referência (p_0) e quantifica-se por 2×10^{-5} Pa. A expressão (2.5) converte as pressões (p) para níveis de pressão sonora (L_p) [1].

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (2.5)$$

2.5. NÍVEL SONORO

Contrariamente aos microfones e outros equipamentos, o ouvido humano não regista as pressões sonoras com total fidelidade, interpretando o som conforme a frequência com que é emitido. Isto é resultado do facto do ouvido humano ter uma sensibilidade auditiva que varia com a frequência, sendo muito mais sensível para frequências na zona dos 2300 a 2800 Hz [1], essa sensibilidade depende também da intensidade sonora do próprio som. Para ultrapassar esta diferença de interpretação de um som/ruído entre os equipamentos e o ouvido humano, foram introduzidos filtros eletrónicos nos aparelhos de medição, corrigindo assim os valores obtidos. As correções que esses filtros induzem, em função das frequências do som captado, são representadas pelas chamadas “curvas de ponderação” (ou simplesmente “filtros”). O filtro *A* é aquele que é usado mais frequentemente, na medida em que adapta o espectro de qualquer som/ruído, não muito intenso, à subjetividade do ouvido humano (e é aquele que tem interesse para este trabalho). Como resultado, o nível sonoro é um valor global expresso em dB(A) e representa a tradução para um só valor, da energia acústica de um ruído filtrado por uma curva de ponderação *A*. Este valor é calculado somando algebricamente os valores dos níveis de pressão sonora captados (em dB) aos valores corretivos da ponderação (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Valores numéricos das ponderações da curva *A* para as bandas de frequência de 1/1 e 1/3 de oitava na gama do audível [1]

Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 de oitava (dB)	Banda de Frequência (Hz)	Ponderação A para 1/3 de oitava (dB)	Ponderação A para 1/1 de oitava (dB)
25	-44,7	-40	800	-0,8	0
31	-39,4		1.000	0	
40	-34,6		1.250	+0,6	
50	-30,2	-26	1.600	+1,0	+1
63	-26,2		2.000	+1,2	
80	-22,5		2.500	+1,3	
100	-19,1	-15,5	3.150	+1,2	+1
125	-16,1		4.000	+1,0	
160	-13,4		5.000	+0,5	
200	-10,9	-8,5	6.300	-0,1	-1
250	-8,6		8.000	-1,1	
315	-6,6		10.000	-2,5	
400	-4,8	-3	12.500	-4,3	-7
500	-3,2		16.000	-6,6	
630	-1,9		20.000	-9,3	

Por fim, todos os valores obtidos são adicionados logaritmicamente entre si expressão (2.6) obtendo o nível sonoro em dB(A) que nunca deve ser confundido com o nível de pressão sonora (que se expressa em dB). O nível sonoro representa-se por “ L_A ”, ou seja, neste caso $L_{soma} = L_A$.

$$L_{soma} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.6)$$

2.6. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA CONTÍNUA EQUIVALENTE

O nível de pressão sonora contínua equivalente (L_{eq}) é um parâmetro descritor “que se define como o nível que se atuasse constante num dado intervalo de tempo, “produziria” a mesma energia que o som que se pretende avaliar” [1]. Deste modo, este parâmetro constitui uma forma de análise no tempo de um qualquer ruído. Isto é importante na medida em que qualquer ruído tem uma duração (havendo casos onde esta é quase instantânea e outros onde é infinita) e na maior parte das situações os níveis de pressão sonora variam nesse espaço temporal. O L_{eq} pode ser dado (em dB) pela expressão (2.7), onde L_i é o nível de pressão sonora uniforme durante o tempo t_i . De forma análoga se pode calcular o nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}) mas é normal que, tanto o L_{eq} como o L_{Aeq} , sejam obtidos diretamente com auxílio de equipamentos.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{\sum t_i} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \cdot 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (2.7)$$

2.7. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA ESTATÍSTICOS

Os níveis de pressão sonora estatísticos (L_N) são parâmetros associados a quantis de densidade de probabilidade. Deste modo o L_N define-se como sendo o nível que num dado intervalo de tempo é excedido em N% da duração desse intervalo temporal. Em termos estatísticos corresponde à marca do quantil N. Estes descritores podem ser obtidos diretamente dos aparelhos de medição, assim como os níveis sonoros estatísticos (L_{AN}), aquando da aplicação do filtro sonoro A. Em Portugal, até ao aparecimento dos novos Regulamento Geral de Ruído e do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios, os descritores mais usados eram o L_{95} e o L_{50} . No entanto, ainda existem legislações internacionais que usam estes parâmetros (L_5 , L_{10} , L_{90} , L_{95} , etc.)

2.8. REFLEXÃO SONORA

Como já referido no subcapítulo 2.1, na maior parte das situações o som propaga-se no ar sob a forma de ondas esféricas e concêntricas tendo a fonte sonora como centro. Normalmente, a propagação da energia sonora dá-se em todas as direções até que encontre um ou mais obstáculos numa ou mais dessas direções em que se propagou.

A reflexão é a mudança de direção que a energia sonora sofre na sua propagação ao incidir em obstáculos. No caso de incidir sobre uma superfície plana, a energia tende a retornar no sentido da fonte (Fig. 2.1). Do ponto de vista da análise de um raio de energia sonora que incida numa superfície plana, sabe-se que o ângulo de incidência θ_i é igual ao ângulo de reflexão θ_r [2] (Fig. 2.2).

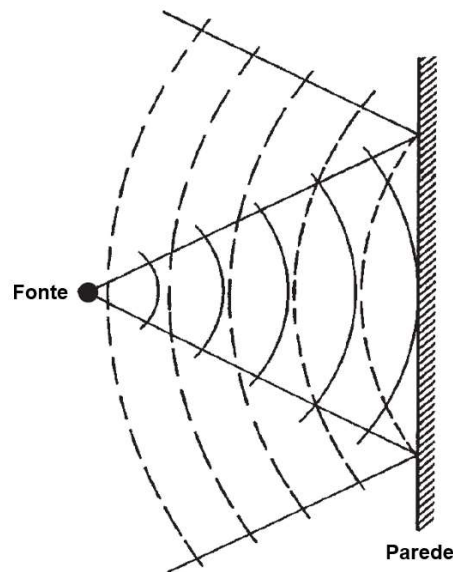
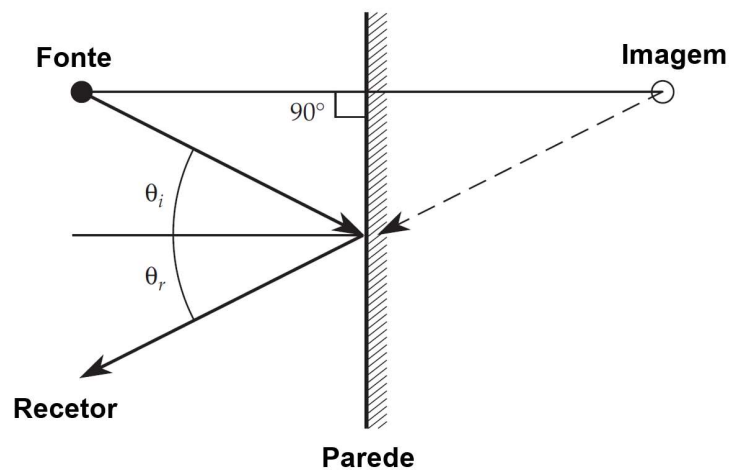


Fig. 2.1 - Reflexão de ondas de energia sonora ao incidir numa superfície plana [2]

Fig. 2.2 - Reflexão de um raio de energia sonora ao incidir numa superfície plana ($\theta_i = \theta_r$) [2]

As reflexões podem ser favoráveis para a criação de um local acusticamente agradável, ou em alguns casos, são responsáveis pelo mau estar acústico sentido em certos espaços.

Nem todas as superfícies são boas refletoras, muitos materiais duros são capazes de constituir superfícies bastante refletoras (como por exemplo o betão e revestimentos como o azulejo), no entanto a água, mesmo no estado líquido, reflete bem o som. A capacidade de reflexão de uma dada superfície está relacionada com a sua capacidade de absorção sonora. Superfícies que refletem apenas uma pequena parte da energia sonora que nelas incide são consideradas absorventes, uma vez que absorvem toda a restante energia que não é refletida.

2.9. ABSORÇÃO SONORA

2.9.1. ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora é a propriedade dos materiais que traduz a sua capacidade de transformar parte da energia sonora que sobre eles incide noutra qualquer modalidade de energia (geralmente a térmica). Esta propriedade (absorção sonora) pode ser quantificada para cada material, através da determinação do coeficiente de absorção sonora, permitindo perceber quais os materiais mais ou menos absorventes.

O coeficiente de absorção sonora (representado por “ α ”) é a relação entre a quantidade de energia sonora que é absorvida por um dado material e aquela que sobre ele incide, tal como a expressão (2.8) indica.

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.8)$$

O coeficiente de absorção sonora de um material terá um valor entre 0 e 1, ou seja, no limite, um material pode absorver 0% da energia sonora que nele incidir (muito refletor) ou, no outro caso extremo, absorver 100% da energia que sobre ele incidir (muito absorvente). De uma forma geral, os materiais que apresentem α superior a 0,5 são considerados absorventes. [1]

O valor do coeficiente de absorção sonora para um determinado material varia com o ângulo de incidência da energia e com a frequência do som, assim, há materiais que absorvem principalmente num determinado conjunto de gamas de frequência. Devido às particularidades deste coeficiente de absorção sonora, a sua determinação é um processo que exige algum rigor pelo que existem dois métodos normalizados de o determinar: método do tubo de ondas estacionárias e método da câmara reverberante.

2.9.2. MATERIAIS E SISTEMAS

Os materiais e sistemas absorventes podem ser divididos em três categorias de acordo com as suas características:

- Porosos e fibrosos;
- Ressonadores;
- Membranas.

Estes atuam em diferentes gamas de frequência, sendo que os materiais porosos são os mais eficazes para altas frequências, os ressonadores nas médias e as membranas nas baixas frequências.

Nos materiais porosos e fibrosos, mais eficazes nas altas frequências, o mecanismo de absorção é baseado na existência de poros e interstícios, nos quais as ondas sonoras incidem transferindo parte da energia para as fibras que resistem por fricção entre elas. Existem diversos tipos de materiais porosos e fibrosos, com diferentes aplicações e características: Tecidos e alcatifas, Massas porosas (para projeção), Aglomerados de fibras de madeira, Fibras minerais (mantas e painéis), Materiais plásticos e Aglomerados de cortiça.

Os ressonadores são aplicados para a absorção das frequências médias. Um ressonador (também denominado ressonador de cavidade ou ressonador de Helmholtz) é formado por uma cavidade com uma única abertura estreita. O ar no gargalo é colocado em vibração, entrando e saindo do gargalo, de modo idêntico ao que acontece num sistema mecânico massa/mola. Existem também ressonadores agrupados, que consistem em painéis perfurados de metal ou de madeira, aplicados com uma caixa de ar pela parte interna do ressonador.

As membranas são os sistemas mais eficazes para atuar na absorção das baixas frequências. Estes sistemas são formados por painéis de grande área e pequena espessura e a absorção da energia sonora é feita através da vibração de toda a estrutura constituída pelos painéis referidos e pela perda de calor por fricção nas fibras do material quando entra em flexão. O sistema será eficaz a absorver energia para a frequência correspondente à frequência natural de vibração.

2.10. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A reverberação consiste no fenómeno de permanência do som no espaço após o final da emissão do estímulo sonoro, por ação das ondas sonoras que são sucessivamente refletidas pelas superfícies do espaço. Este fenómeno ocorre devido ao diferente percurso executado pelas ondas sonoras denominadas como diretas, que chegam aos ouvidos diretamente a partir do recetor, e as ondas refletidas, que após a sua emissão sofrem reflexões pelas superfícies do compartimento e só depois atingem o ouvido, chegando assim com um atraso que prolonga o som após o fim da sua emissão [1]. O tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora detetado após o fim da emissão sonora decaia 60 dB [1]. No entanto, em medições, como muitas vezes o nível de pressão sonora de ruído de fundo presente no espaço em estudo não permite detetar um decaimento de 60 dB, é comum considerar um decaimento mais pequeno, de 20 ou 30 dB, e extrapolar o resultado obtido para o decaimento de 60 dB pretendido (Fig. 2.3). O valor de 20 a 30 dB é representativo e facilita a determinação do tempo de reverberação em espaços comuns que facilmente atingem os 60 dB de ruído de fundo, o que obrigaria à utilização de fontes sonoras muito potentes para a determinação do tempo de decaimento de 60 dB. [2]

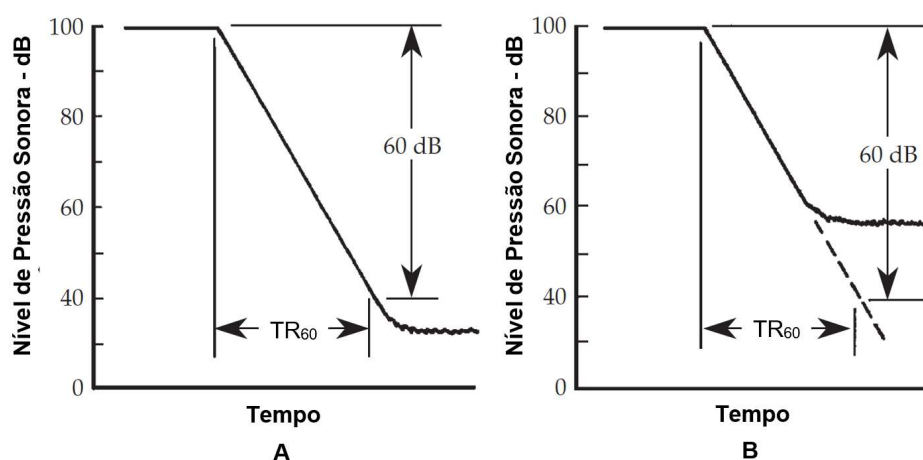


Fig. 2.3 - Curvas de decaimento para medição do tempo de reverberação. No caso A, o ruído de fundo apresenta um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que seja detetável a redução de 60 dB no nível de pressão sonora do ruído de teste. No caso B o ruído de fundo não tem um nível de pressão sonora suficientemente baixo para que essa redução seja detetável, pelo que se faz uma extrapolação para os 60 dB a partir da redução medida. [2]

O tempo de reverberação de um espaço pode ser obtido através da sua medição ou, aproximadamente, por determinação analítica. Existem várias fórmulas que permitem o seu cálculo, adaptando-se cada uma de forma mais adequada a diferentes situações. [1]

a) Fórmula de Sabine: adequada para ambientes sonoros difusos e com um $\alpha_{\text{médio}}$ inferior a 0,20;

$$T = \frac{0.16 \times V}{A} \quad (2.9)$$

sendo:

- T – tempo de reverberação (s);
- V – volume do compartimento (m³);
- A – absorção sonora equivalente (m²):

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times S_i \quad (2.10)$$

com: α_i – coeficiente de absorção sonora do material i ;
 S_i – área da superfície do material i (m²);

b) Fórmula de Eyring: adequada a espaços onde todas as superfícies da envolvente têm α_i semelhantes;

$$T = \frac{0.16 \times V}{-S \times \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.11)$$

sendo:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{\sum S_i} \quad (2.12)$$

c) Fórmula de Millington-Sette: adequada para espaços em que existem diferenças significativas entre os coeficientes de absorção sonora das diversas superfícies;

$$T = \frac{0.16 \times V}{-\sum_{i=1}^N S_i \times \ln(1 - \alpha_i)} \quad (2.13)$$

d) Formulação genérica da fórmula de Sabine: pode ser genericamente definida pela expressão (2.14).

$$T = \frac{0.16 \times V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i + \sum_{j=1}^M A_j + mV} \quad (2.14)$$

em que:

- A_j – absorções sonoras localizadas (m²);
- m – absorção sonora do ar (m⁻¹) em função da humidade relativa.

O tempo de reverberação deve ser adequado à utilização pretendida, deste modo o espaço terá um ambiente sonoro agradável para a sua finalidade. Caso seja excessivamente curto pode conduzir a uma sensação de desconforto, de falta de privacidade e no caso da música, a demasiada claridade das notas musicais. No caso de ser demasiado longo, as sílabas ficam difíceis de perceber, com isto a inteligibilidade da palavra cai significativamente e na música dá-se a sobreposição de notas e sons. O (Quadro 2.2) refere valores ideais de tempo de reverberação médio, de acordo com a utilização.

Quadro 2.2 - Valores ideais para os tempos de reverberação médios (500/1k Hz) dos espaços, de acordo com a sua utilização. [1]

Tipo de Utilização	T mínimo (s)	T máximo (s)
Conferências ou palestras	0,7	0,8
Teatro	0,7	0,9
Auditórios polivalentes	1,4	1,9
Igrejas e catedrais	1,2	>3,4
Música sinfónica ou de coro com sistema de som	1,1	1,9
Orquestras contemporâneas, recitais ou música de câmara	1,2	1,9
Ópera	1,3	4,0
Canto gregoriano	3,0	4,0
Música sinfónica	1,4	2,2
Coro ou órgão	1,9	>3,4

2.11. RUÍDO DE FUNDO

Ruído de Fundo é o conjunto de todos os sons ou ruídos escutados num local que não têm origem na fonte ou nos ouvintes. Geralmente os ruídos considerados nesta categoria são estáveis e contínuos, por exemplo, com origem em sistemas de ar condicionado, tráfego de veículos, etc. Este tipo de ruído interfere na inteligibilidade do som primário produzido e ouvido no local.

2.12. RASTI

O RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) mede a inteligibilidade da palavra por meios objetivos indiretos, podendo variar entre 0 (nula inteligibilidade) e 1 (ótima inteligibilidade) [1]. É medido com recurso a um altifalante capaz de reproduzir certas características da voz humana e um recetor.

2.13. AC

O AC (*Articulation Class*), pertence aos parâmetros objetivos de avaliação da inteligibilidade da palavra e é obtido através da diferença (ΔL) entre o nível de conversação de referência (n_c) e o nível de ruído de fundo (r_f) no local, pesada através da importância relativa de cada banda frequência de 1/3 de oitava (p). A análise é feita na gama dos 200 aos 5000 Hz. (Quadro 2.3)

$$AC = \sum_{i=1}^{15} \Delta L_i \cdot p_i \quad (2.15)$$

Quadro 2.3 - Valores para método de obtenção do parâmetro AC [1]

Freq. (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)	Freq. (Hz)	Nível de conversação (nc)	Peso (p)
200	67	4	1250	62	30
250	68	10	1600	60	37
315	69	10	2000	59	37
400	70	14	2500	57	34
500	68	14	3150	55	34
630	66	20	4000	53	24
800	65	20	5000	51	20
1000	64	24			

2.14. SIL

O SIL (*Speech Interference Level*) é também um parâmetro objetivo de inteligibilidade e define-se como a média aritmética dos ruídos de fundo em cada uma das bandas de oitava dos 500 aos 2000 Hz.[1]

$$SIL (dB) = (RF_{500Hz} + RF_{1kHz} + RF_{2kHz})/3 \quad (2.16)$$

No Quadro 2.4 estão representados os valores de SIL (em dB) para o qual a comunicação é, no limite, possível.

Quadro 2.4 - SIL (dB) para o qual a comunicação é, no limite, possível. (M: Masculino; F: Feminino) [1]

Distância (m)	SIL (dB)							
	Esforço de Voz							
	Normal		Elevado		Muito Alto		Gritando	
	M	F	M	F	M	F	M	F
0,3	68	63	74	69	80	75	86	81
1,0	58	53	64	59	70	65	76	71
2,0	52	47	58	53	64	59	70	65
3,0	48	43	54	49	60	55	66	61
4,0	46	41	52	47	58	53	64	59

3

ACÚSTICA DE ESTAÇÕES DE METRO

3.1. ESTAÇÕES DE METRO

3.1.1. DEFINIÇÃO

Um Metropolitano é, em definição, um sistema de transporte urbano de circulação rápida, composto por carruagens movidas a eletricidade que circulam num percurso total ou parcialmente subterrâneo. [3]

As estações de metro são parte constituinte dos sistemas de metropolitano e permitem o acesso às plataformas onde as carruagens que percorrem as várias linhas fazem as suas paragens. São diariamente utilizadas por um grande número de pessoas e por isso necessitam de estar preparadas com recurso a: máquinas para a compra de bilhetes; sistemas de aviso público; equipamentos de segurança; equipamentos de acesso (escadas rolantes, elevadores, túneis, etc.); quartos de banho. É imperativo que qualquer utilizador com necessidades especiais seja capaz de utilizar todas as valências da estação sem auxílio. Em casos de emergência, uma estação de metro deve ser fácil de evacuar e deverá assegurar a segurança de todos os utilizadores. Uma grande parte dos sistemas metropolitanos é subterrânea, por conseguinte, as respetivas estações também o serão, devendo a sua entrada e saída à superfície ser bem sinalizada.

O facto de se tratarem de locais fechados com grande tráfego humano traz preocupações no âmbito da acústica. Serão estas preocupações que irão ser estudadas nesta dissertação.

3.1.2. PRIMEIRAS LINHAS DE METRO

No séc. XIX, com grande influência da revolução industrial, observou-se um rápido crescimento das cidades. Em Londres, este crescimento, aliado à necessidade de deslocação das pessoas, levou a que houvessem problemas de trânsito na cidade. Tendo em vista solucionar este problema de tráfego, foi inaugurada em 1863 a primeira linha de comboio subterrânea. Esta havia sido proposta em 1830, mas só em 1850 a ideia foi tomada como solução válida para os problemas de automóveis e trânsito. A linha fazia a ligação entre a estação de *Paddington* e a estação de *Farringdon Street*, com passagem por *King's Cross* e em poucos meses de funcionamento já transportava cerca de 26.000 passageiros diariamente.[4]

No entanto, o fumo gerado pelas locomotivas causava grande incómodo nos utilizadores, isto porque o facto das linhas serem subterrâneas tinha como grande desvantagem a reduzida renovação de ar. Esta situação levou a um encerramento da linha, apesar de vários esforços e propostas de adaptação dos túneis para melhorar a ventilação. A Fig. 3.1 mostra uma carruagem da primeira linha de comboio subterrânea.

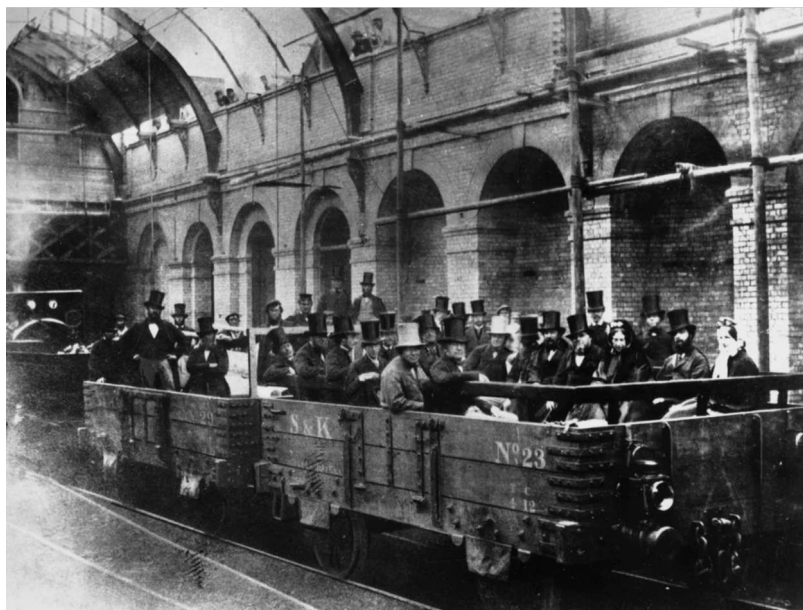


Fig. 3.1 - Primeira linha de comboio subterrâneo em Londres (1863) [5]

O problema foi finalmente resolvido graças à eletrificação dos túneis e em 1890 foi aberta à população a primeira linha de metropolitano. Trata-se de um marco histórico e o seu sucesso conduziu à inauguração de várias linhas de metropolitano pelo mundo. [4]

Em 1896 começou a funcionar na Hungria o Metro de Budapeste, que foi o primeiro sucessor ao Metro de Londres. O *Budapesti metró* é desde 2002 considerado património mundial. Ainda em 1896 foi inaugurado também o *Glasgow Subway*, que serve ainda hoje a cidade escocesa. Muitas cidades seguiram o exemplo do Metro de Londres e com a viragem para o séc. XX foram construídas vários sistemas de Metro por todo o mundo. O Quadro 3.1 enumera cronologicamente as primeiras 20 cidades onde foram construídos sistemas de metropolitano. [6]

Alguns sistemas de metro merecem distinção: o metro de Londres, sendo o que tem maior extensão de linha subterrânea; o metro de Tóquio, com o maior de passageiros por dia, cerca de nove milhões; e o metro de Nova York, que com 424 estações, é o sistema de metro com maior número de estações.

Em Portugal, o primeiro sistema metropolitano foi inaugurado em 1959 em Lisboa. Atualmente é constituído por quatro linhas maioritariamente subterrâneas, cobre quase todo o Município de Lisboa e alcança os municípios vizinhos de Amadora e Odivelas.

Após a inauguração do metropolitano de Lisboa foi aberto em 1995 na zona de Mirandela uma ferrovia métrica rural clássica totalmente superficial, denominada “Metropolitano Ligeiro de Mirandela”.

A terceira rede metropolitana a começar a funcionar em Portugal foi a do Metro do Porto. Começou o seu funcionamento em 2001 e é atualmente o maior sistema ferroviário ligeiro em Portugal, com uma extensão de cerca 70 km e aproximadamente 8 km, em rede subterrânea. Este sistema será usado como caso de estudo nesta dissertação.

Existem também em Portugal o “Metro Sul do Tejo”, inaugurado em 2007, que serve os concelhos de Almada e Seixal e está em construção desde 2006 o “Metro Mondego”, em Coimbra, mas devido a vários problemas de financiamento a obra tem estado frequentemente parada. [7]

Quadro 3.1 - Primeiras 20 cidades a serem servidas de Metropolitano [6]

Cidade	Ano	Cidade	Ano
Londres	1863/1890	Hamburgo	1912
Budapeste	1896	Buenos Aires	1913
Glasgow	1896	Madrid	1919
Chicago	1897	Barcelona	1924
Paris	1900	Tóquio	1927
Boston	1901	Osaka	1933
Berlim	1902	Moscovo	1935
Atenas	1904	Estocolmo	1950
Nova Iorque	1904	Toronto	1954
Filadélfia	1907	Roma	1955

3.1.3. ESTAÇÕES DE METRO E OS SEUS UTILIZADORES

As preocupações acústicas associadas às estações subterrâneas de metro têm a sua razão de existir na necessidade de garantir conforto aos seus utilizadores, assim sendo, torna-se pertinente conhecer algumas das estações com maior número de passageiros, de modo a se entender o quão importante é o seu estudo acústico.

Contabilizando um dia numa das estações mais movimentadas do mundo, como na estação de Ikebukuro (Metro de Tóquio), por ela passam cerca de 550.000 passageiros. Na estação Xizhimen (Metro de Pequim), onde se processa a intersecção de três linhas, durante um dia são registados aproximadamente 480.000 passageiros. [8, 9]

Os dados relativos a utilizadores das estações de metro tornam-se mais expressivos quando se analisa um ano inteiro. Na Europa, uma das estações de metro mais movimentadas é a *Gare du Nord* (Metro de Paris), nela circulam anualmente quase 50 milhões de passageiros. [10]

É assim notória a importância da acústica nestes espaços, onde os principais cuidados são zelar pelo conforto auditivo das pessoas que as frequentam, assim como assegurar que são inteligíveis todos os avisos sonoros emitidos pelos sistemas de aviso públicos.



Fig. 3.2 - Estação *Gare du Nord* da linha 5 do metro de Paris, França [10]

3.2. ACÚSTICA DE ESTAÇÕES DE METRO

3.2.1. ACÚSTICA

Na história da humanidade, a acústica e a arquitetura dos espaços teve sempre grande influência nos nossos antepassados, e na sua relação com a música, teatro e discurso. A sua influência marcou o desenvolvimento de estilos musicais, que tiveram a sua génese em estilos arquitetónicos aplicados a igrejas e vice-versa. A igreja teve uma forte influência, uma vez que o canto era visto como uma forma de prece, de estar mais próximo de Deus. Assim as composições musicais foram sendo criadas à medida das características acústicas do espaço. [11]

O filósofo Pitágoras de Samos (VI a.C.) foi um dos primeiros a estudar a “acústica” e em conjunto com outros membros da Escola Pitagórica fez contribuições no estudo da teoria musical e harmónica. Estes possuíam já conhecimento dos processos de geração, propagação e perceção do som, também estudados depois por Aristóteles (IV a.C.).

Existiam na época algumas dúvidas relativamente à relação entre a velocidade de um som e a sua frequência. Estas foram clarificadas por Theophrastos de Eresos (370-285 a.C.): “A nota aguda não difere em velocidade, pois se o fizesse chegaria ao recetor mais cedo, e não haveria concordância. Se existe concordância, ambas as notas terão de ter a mesma velocidade.” [11]

Nos séculos III e I a.C., os filósofos Crisipus e Lucretius respetivamente, apresentaram estudos relativamente à origem do som e ao conceito de reverberação. [1] No século I a.C. Marcus Vitruvius Pollio escreve a primeira obra sobre acústica arquitetónica com o título *De Architectura*. Nela apresenta noções sobre a acústica de anfiteatros, fala a cerca dos problemas de inteligibilidade e sobre a posição e orientação da audiência. [11]

Com o decorrer dos anos, foram vários os autores que contribuíram para enriquecer o conhecimento acústico:

Marin Mersenne (1588-1648) desenvolveu leis, que descrevem os harmónicos da vibração de uma corda (guitarras e pianos), também escreveu um trabalho sobre teoria musical *Harmonie universelle*; [11]

Athanasius Kircher (1602-1680) nas suas obras *Musurgia universalis* e *Phonurgia Nova* estudou fenómenos acústicos. Em *Phonurgia Nova* examinou formas de amplificar o som para aplicações arquitetónicas e assim como a relação entre a geometria e a acústica de salas; [12]

John Tyndall (1820-1893) escreveu a obra *On Sound* e participou no projeto Britânico para melhoramento de roncadas de faróis;

Lord Rayleigh (1842-1919) escreveu o livro *The Theory of Sound* e foi prémio nobel da física em 1904, com a descoberta do elemento Árgon. [11]

Especialmente na acústica de edifícios este desconhecimento levou no séc. XIX Jean Garnier, projetista da ópera de Paris, a escrever um desabafo de frustração: “*Esforcei-me por dominar esta ciência bizarra [acústica], mas... em nenhum lugar encontrei uma regra positiva para me guiar; pelo contrário, nada mais do que declarações contraditórias... Devo explicar que não adotei nenhum princípio, que o meu plano não foi baseado em teorias, e que deixo o sucesso ou fracasso ao acaso... como um acrobata que fecha os olhos e se segura às cordas de uma trave ascendente.*” [11]

De grande relevo para a acústica de edifícios é o contributo do físico americano Wallace Clement Sabine (1869-1919). Sabine começou os seus estudos em acústica por meio do Presidente Elliot da Universidade de Harvard, onde Sabine era professor, este propôs-lhe a correção de um dos auditórios. Com este desafio, e com a realização de várias experiências, descobriu a relação entre o volume, a absorção sonora e o tempo de reverberação de um espaço. Em 1898 traduziu essa relação com a atual fórmula de Sabine. [1]



Fig. 3.3 - Wallace Clement Sabine, Físico, Professor em Harvard e “Pai” da Acústica de Edifícios [13]

A acústica como a conhecemos hoje foi também marcada pela invenção do telefone, erradamente atribuída a Alexander Graham Bell (1847-1922), esta foi da autoria de Antonio Meucci (1808-1889) por volta de 1860. Juntamente com a invenção do fonógrafo e do filme por Thomas Edison (1847-1931), a área da eletroacústica começava a ganhar força.

Em 1911, o médico otorrinolaringologista francês Étienne Lombard (1869-1920) descobriu o Efeito Lombard, no qual uma pessoa tende involuntariamente a subir o tom de voz quando se encontra num ambiente ruidoso. Esta descoberta foi posteriormente colmatada por Korn que em 1954 descobriu que níveis de intensidade da palavra abaixo dos 45 dB(A) não interferem com o ruído de fundo e, portanto, nesses casos não se verifica o Efeito Lombard.

Como já visto no Capítulo 2 desta dissertação, existem várias fórmulas para o cálculo do tempo de reverberação (adaptações da fórmula original proposta por Sabine) surgidas em 1930 por *Eyring-Norris* e *Millington-Sette*. Estas adequam a fórmula inicial tendo em conta a homogeneidade ou heterogeneidade da absorção das superfícies envolventes. Também Kuttruff, em 1970 adaptou a equação do T_r para ter em conta a forma geométrica do espaço.

No âmbito da inteligibilidade da palavra e do ruído, Colin Cherry (1914-1979) desenvolveu o conceito de *Cocktail Party*, no qual uma pessoa tem a habilidade de se focar num só orador apesar de se encontrar num local com ruído de fundo e com várias conversas a acontecer em simultâneo.

Meyer, em 1954 elabora algumas teses sobre difusão e sobre os fenómenos de decaimento de energia. Estudou fórmulas relacionadas com uma impressão acústica a qual deu o nome de ‘clareza’ ou ‘definição’, ainda hoje utilizadas.

Leo Beranek (1914-2016), autor do livro *Music, Acoustics and Architecture*, sugere que a abordagem acústica de salas deve ir além do tempo de reverberação, uma sala com qualidade para receber peças musicais deverá considerar outros parâmetros como a vivacidade, clareza, etc. [11]

3.2.2. PRIMEIRAS INTERVENÇÕES ACÚSTICAS EM ESTAÇÕES DE METRO

As linhas de metropolitano com estações subterrâneas são um caso particular dos transportes ferroviários. Devido à existência de uma envolvente com características acústicas refletoras, surgem nestas algumas situações de ruído específicas. [1] De salientar:

- | | |
|----------------------------------|------------------------|
| - ruído de fundo (sem comboio); | - fecho de portas; |
| - chegada do comboio; | - partida do comboio; |
| - abertura das portas; | - passagem do comboio. |
| - ruído de comboio estacionário; | |

Sendo o metropolitano um meio de transporte utilizado por milhares de pessoas todos os dias, desde o início do séc. XX começaram a surgir estudos acústicos com vista a caracterizar e avaliar a sua influência na vida das pessoas que nele se deslocam e daquelas cuja residência se localiza próximo das linhas.

As primeiras medições efetuadas em estações de metro ocorreram em 1932 no decorrer da avaliação de ruído nas linhas de trânsito rápido de Nova Iorque. No artigo ‘*The noise survey of the rapid transit lines of New York City*’ por Stanton e Tweeddale,[14] são descritas medições em vários tipos de linhas elevadas e em subterrâneas, dentro e fora dos vários tipos de carruagens (Quadro 3.2 e Quadro 3.3). O ruído excessivo afetava tanto os passageiros das linhas elevadas como os das subterrâneas, no entanto apenas as linhas elevadas tinham efeito no decréscimo do valor das propriedades circundantes. O abandono de linhas elevadas já existentes e a construção de todas as futuras linhas em subterrâneo envolveria uma grande perda de capital investido e traria custos muito maiores do que para a construção de linhas elevadas.

Quadro 3.2- Níveis de Pressão Sonora Médios para diferentes tipos de carruagens do sistema de trânsito de Nova Iorque, a circular em linhas de ambiente aberto e operando a uma velocidade de 64 km/h [adaptado de 14]

Carruagem	Localização	Nível de Pressão Sonora Médio (dB)	ΔL (dB)
Tipo A – <i>Old type, single shell, steel car</i>	Exterior	90,5	-
Tipo B – <i>Modern, insulated double shell, steel car</i>	Interior: Janelas abertas	82,5	5,0
	Interior: Janelas fechadas	77,5	
Tipo C – <i>New type, insulated double shell, steel car</i>	Exterior	87,0	-
	Interior: Janelas abertas	86,5	4,0
	Interior: Janelas fechadas	82,5	
Tipo D – <i>Insulated double shell, articulated steel car sections</i>	Exterior	84,0	-
	Interior: Janelas abertas	80,0	5,0
	Interior: Janelas fechadas	75,0	
	Exterior	86,5	-

Quadro 3.3 – Comparação entre os valores medidos para estruturas elevadas e para estruturas subterrâneas do sistema de trânsito de Nova Iorque, para o mesmo tipo de comboio (Tipo A – *Old type, single shell, steel car*)

[adaptado de 14]

Média dos Níveis de Pressão Sonora medidos para diferentes tipos de Estruturas Elevadas (dB)	88,2
Média dos Níveis de Pressão Sonora medidos para diferentes tipos de Estruturas Subterrâneas (dB)	94,3
ΔL (dB)	6,1

Este estudo foi realizado para avaliar os efeitos incomodativos dos vários tipos de linhas elevadas nas habitações próximas, de modo a optar pelo melhoramento acústico dessas linhas elevadas ou pela construção de novas linhas subterrâneas alternativas. [14]

Nos anos que precederam a segunda guerra mundial foi levado a cabo na zona de Chicago um estudo do ruído de tráfego, de veículos de transporte coletivo e industrial. Uma fase dos trabalhos foi o estudo do ruído nos vários tipos de veículos, incluindo carruagens de linhas elevadas e de metro, linhas suburbanas, comboios a vapor e automóveis. Para além de medições do nível sonoro total foram feitas medições nas bandas de oitava do espectro de frequências audíveis (Quadro 3.4). Este estudo à semelhança do realizado em Nova Iorque permitiu comparar o espectro acústico dos vários tipos de sistemas de transporte e traçar curvas que ilustrem estas diferenças características. [15]

Quadro 3.4 – Valores de nível pressão sonora (dB) medidos dentro e fora das carruagens de linhas elevadas e subterrâneas do sistema de trânsito de Chicago, para espectro completo de frequência e entre os 400-800 Hz
[adaptado de 15]

Tipo de Linhas	L _p medido dentro das carruagens (dB)		L _p medido na proximidade das carruagens (dB)	
	(espectro completo)	(400-800 Hz)	(espectro completo)	(400-800 Hz)
Elevadas	85	68	78	66
Subterrâneas	95	91	94	87

Uma das primeiras intervenções acústicas nas linhas de metro ocorreu em Londres por volta da década de 1930, e envolveu o uso de material absorvente nos túneis. O relatório desta intervenção "*Silencing London's Tubes*" foi publicado em 1939 por John S. Trevor na revista "*Bulletin of the International Railway Congress Association*". [16]

No início dos anos 1850 foram efetuados teste experimentais no metro de Paris, com a intenção de eliminar o ruído proveniente do contacto metal com metal das rodas e carris através da instalação de pneus de borracha.[16]

Durante muitos anos, uma das fontes de ruído mais incómodas na sociedade eram as linhas de metro. Apesar do crescimento do tráfego aéreo, o ruído do metropolitano continuava a ser o meio que gerava mais queixas por parte das populações. Os responsáveis dos transportes públicos estavam cientes disso e ao longo dos tempos tentaram atenuar o ruído e as vibrações para níveis mais aceitáveis.

No entanto, a maioria das intervenções era orientada para apaziguar as queixas dos vizinhos das linhas e não para melhorar a condição de passageiro. Uma vez que o metropolitano era visto como um meio de transporte de baixo custo, o investimento no conforto do passageiro era pensado como um luxo, e por isso descurado.

As linhas do metropolitano de Toronto (1954) seguiram o exemplo do metro de Londres na tentativa de melhorar o conforto dos utilizadores, almejando com isto recuperar o investimento com o aumento do número de passageiros. O estudo da linha manteve, no entanto, a preocupação de minimizar o ruído nas habitações próximas. Para tal tentaram estabelecer mínimos de ruído aceitáveis para todos os possíveis lesados. Por exemplo, para os habitantes dos pisos térreos adjacentes às linhas subterrâneas a única opção era a inaudibilidade do metro. Um outro grande problema eram as vibrações estruturais. Em certas

zonas em que a linha ficava imediatamente por baixo de construções foi necessário um esforço especial para minimizar a continuidade estrutural entre o metro e as fundações dos edifícios.

Para o ambiente dentro das carruagens a maior preocupação foi a capacidade de comunicação entre passageiros, para além da incapacidade de manter uma conversa ser por si algo mau procurou-se também evitar o sentimento de solidão nos utilizadores. Contudo algum ruído era aceitável e até desejado para assegurar a privacidade da palavra. Foi avaliado o nível de interferência na conversação, os valores obtidos são descritos no Quadro 3.5. [16]

Quadro 3.5 - Nível de interferência na conversação (SIL - *speech interference level*) médio nas carruagens de superfície e subterrâneas de Toronto [adaptado de 16]

		SIL (dB)
Dentro das carruagens em movimento com as janelas fechadas	Secções abertas	57
	Túnel – velocidade normal	62
	Túnel – velocidade alta	65
Dentro das carruagens em movimento com as janelas abertas	Secções abertas	69
	Túnel – velocidade baixa	66
	Túnel – velocidade normal	70
	Túnel – velocidade alta	76
Na plataforma da estação com o comboio a chegar		70-75
Dentro das carruagens modernas PCC	Velocidade Normal	60-70
	Interseção de Carruagens	78

No ano de 1975 Konheim e Ruth [17] conduziram um estudo com vista a determinar os possíveis perigos que o ruído de sistemas de transporte subterrâneo poderia causar na saúde dos passageiros. Utilizaram dados de estudos anteriores assim como dados obtidos especificamente para este estudo. A análise consistiu em calcular os efeitos da exposição ao ruído na saúde para diferentes durações de viagem e os níveis de exposição de ruído no local de trabalho.

No mesmo ano de 1975, o planeamento do projeto para o sistema de trânsito rápido da cidade de Denver foi um dos primeiros a contemplar estudo de impactes ambientais no que diz respeito ao ruído e vibrações. O planeamento incluiu a comparação das fontes de ruído dos vários tipos de transporte, o estabelecimento de critérios de ruído e vibração, previsões para o impacto do ruído, assim como a avaliação das medidas de redução de ruído e os seus custos. [17]

O elemento fundamental de qualquer sistema de metropolitano, quer seja ele subterrâneo ou superficial é sem dúvida a carruagem. Esta deve estar adaptada às linhas onde circula e promover o conforto e a segurança dos passageiros que transporta. A expansão dos sistemas de transporte rápidos por todo o mundo levou à existência de vários tipos e modelos de carruagem. No entanto alguns modelos ganharam fama pelo seu ótimo desempenho e passaram a ser utilizados noutros países, como é o caso da carruagem PCC.

A carruagem PCC (*Presidents' Conference Committee*) foi construída nos Estados Unidos da América na década de 1930 (Fig. 3.4). O seu *design* teve grande sucesso a nível nacional e após a segunda guerra mundial foi licenciada para todo o mundo. Em 1976, Wolfe, promoveu a análise do ruído provocado pelos diversos tipos de rodas das várias carruagens PCC a circular na MBTA (*Massachusetts Bay Transportation Authority*) *Green Line*. [18, 19]



Fig. 3.4 –Carruagem PCC (*Presidents' Conference Committee*) utilizada mundialmente [20]

As primeiras linhas de metropolitano construídas não tinham o desempenho acústico como principal foco, por esse motivo no último terço do século XX algumas estações já careciam de melhoramentos. Um exemplo é o projeto de modernização da estação de *Park Street* em Boston no ano de 1977. Levado a cabo por Kleinschmidt teve como principal preocupação o ruído das rodas sobre os carris em curvas de raio apertado (*wheel squeal*) e também a redução do ruído de circulação e travagem nos pisos superiores e inferiores. Neste projeto procedeu à medição das características acústicas presentes e estimou o efeito dos tratamentos de redução de ruído. [21]

O constante desenvolvimento das grandes cidades e a crescente dependência do metropolitano como meio de transporte diário fomentou a criação de novas e maiores estações de metro. Desde a criação da primeira linha subterrânea em 1863 sempre foi necessário assegurar a ventilação das linhas e das estações, não só para a renovação de ar, mas também para baixar a temperatura ambiente dos túneis, que estão sujeitos a acumulação de calor por parte das interações entre roda e carril, pelos equipamentos de travagem e hoje em dia pelos sistemas de ar condicionado das carruagens. As infraestruturas e equipamentos de ventilação podem, no entanto, ser causadoras de ruído tanto para o interior como para o exterior da estação.

O primeiro estudo com especial atenção para esta problemática é publicado em 1978 por Lee com o título 'Noise Control for Fan and Vent Shafts in Subways'[22]. Nele descreve o papel que as condutas com ou sem extração mecânica têm na transmissão de ruído, assim como métodos para redução deste problema. Completa o seu estudo com a apresentação de medições antes e após tratamento acústico do ruído de ventilação nas plataformas das estações e fora das aberturas de ventilação para a superfície (Quadro 3.6) e com o tempo de reverberação na plataforma (Quadro 3.7).

A descrição que Lee faz da transmissão de ruído através dos sistemas de ventilação pode ser brevemente resumida da seguinte forma:

Existem dois meios que necessitam de controlo de ruído, as condutas de ventilação com ventoinha e as condutas de respiração.

Nas condutas de ventilação a intrusão de ruído pode ter três formas:

Transmissão do ruído das ventoinhas pelas condutas de ventilação e aberturas para a superfície até aos edifícios situados perto das aberturas à superfície; Transmissão de ruído das ventoinhas para os passageiros nas carruagens aquando da passagem destas pelas aberturas das condutas de ventilação dos túneis; E a transmissão de ruído das ventoinhas através das condutas de ventilação e dos túneis até às estações onde o ruído será ouvido pelos usuários da estação.

Nas condutas de respiração ou aberturas o único problema de ruído é a transmissão do ruído aéreo das carruagens nos túneis através das condutas de respiração até aos edifícios junto das aberturas à superfície. [22]

Quadro 3.6 – Níveis Sonoros das pás de ventilação medidos antes e depois do tratamento numa estação da *Bay Area Rapid Transit System* (São Francisco) [adaptado de 22]

Localização	Ventoinha Norte			Ventoinha Sul		
	Antes do tratamento (dB(A))	Depois do tratamento (dB(A))	ΔL (dB)	Antes do tratamento (dB(A))	Depois do tratamento (dB(A))	ΔL (dB)
grade de saída de ar	92	93	+1	95	95	0
9m a oeste da grade de saída de ar	67	67	0	71	65	-6
9m a este da grade de saída de ar	70	62	-8	67	71	+4
9m a sul da grade de saída de ar	71	71	0	72	70	-2
sala das ventoinhas	104	105	+1	106	105	-1
no registo dentro do túnel	102	101	-1	102	103	+1
ponta sul da plataforma	94	90	-4	91	95	+4
30m da ponta sul da plataforma	89	80	-9	78	91	+13
60m da ponta sul da plataforma	-	72	-	72	-	-
centro da plataforma	81	66	-15	64	83	+19
30m da ponta norte da plataforma	-	58	-	59	-	-

Quadro 3.7 – Tempos de Reverberação para várias bandas de oitava [125-8k Hz] na plataforma de uma estação da *Bay Area Rapid Transit System* (São Francisco) antes e depois do tratamento [adaptado de 22]

Banda de Oitava (Hz)	Tempo de Reverberação (s)		ΔTR (s)
	antes do tratamento	depois do tratamento	
125	14,0	1,5	-12,5
250	13,0	1,3	-11,7
500	9,0	1,3	-7,7
1000	7,0	1,6	-5,4
2000	4,7	1,5	-3,2
4000	2,8	1,4	-1,4
8000	1,0	1,0	0

A Organização Mundial de Saúde reconheceu o ruído excessivo na comunidade como um sério problema de saúde pela primeira vez em 1980, e no ano de 1999 editou o documento ‘*Guidelines for Community Noise*’ como forma de resposta prática à necessidade de agir contra o ruído a nível local, assim como à necessidade de melhorar a legislação. [23]

Mais recentemente, foi elaborado em 2006 outro estudo sobre a influência da exposição ao ruído na saúde, desta vez tendo como caso de estudo o sistema de transportes da cidade de New York. Foram efetuadas mais de 90 medições, mediram-se valores médios e máximos nas plataformas das estações subterrâneas, foram também medidos valores máximos dentro das carruagens e em algumas paragens de autocarro para possíveis comparações (Quadro 3.8). [24]

Quadro 3.8 – Comparação dos 5 s de nível sonoro máximo entre plataformas subterrâneas, carruagens subterrâneas e paragens de autocarro do sistema de trânsito de Nova Iorque [adaptado de 24]

	Intervalo de 5 segundos com nível sonoro máximo	
	Nível sonoro médio (dBA)	Pico de nível sonoro (dBA)
Plataformas Subterrâneas	93,5	106,0
Carruagens Subterrâneas	94,9	112,0
Paragens de Autocarro	84,1	89,0
ΔL máximo	10,8	23,0

3.2.3. AVANÇOS NO TRATAMENTO E DIMENSIONAMENTO ACÚSTICO DE ESTAÇÕES DE METRO

O controlo de ruído em estações de metro é muito importante para a inteligibilidade da palavra, como já referido nesta dissertação. Outra razão para o controlo de ruído é o bem-estar dos que circulam nas estações de metro e para aqueles que lá trabalham. Os funcionários de estações de metro estão sujeitos diariamente a ruído de baixa frequência. Esta exposição prolongada pode causar, para além de stress e ansiedade, VAD (*VibroAcoustic Disease*). [25]

Esta doença começou a ser estudada no final da década de 1980 e está associada à exposição continuada a ruídos de baixa frequência. Algumas profissões propícias a desenvolver esta doença são por exemplo: pilotos comerciais e militares, operários de bordo, maquinistas de navios, empregados de restaurante, DJ's. [25]

Apesar das equipas de projeto responsáveis pelo dimensionamento das estações de metro estarem cada vez mais alertadas para a importância da acústica das estações existem outros problemas cuja solução é priorizada. Os materiais utilizados nos revestimentos das estações, que tanta importância têm no desempenho acústico, nem sempre contribuem para melhorar as características acústicas do espaço, pois são muitas vezes materiais duros, lisos e polidos, de modo a terem melhor comportamento a nível de fogo, vandalismo, manutenção e higiene. Estes materiais lisos, como azulejos e vidro ou a existência de uma parede lisa, simplesmente estucada, têm uma capacidade de absorção sonora muito baixa. O correto uso de materiais de absorção e difusão é fundamental para assegurar um funcionamento acústico ótimo.

A acústica de estações de metro foi na sua primeira fase mais ligada à caracterização e avaliação do comportamento das estações após construção, aos impactes causados no ser humano e à reabilitação e melhoramento das condições acústicas existentes. Com o aproximar do séc. XXI, tomou um novo rumo, tendo como principal foco a conceção e planeamento, prévio à construção das estações de metro.

Sendo a construção de estações subterrâneas um tipo de obra complexo e bastante dispendioso, é de todo o interesse que a acústica destas seja exaustivamente estudada, planeada e definida antes do começo da construção. Não só o produto final será melhor, com funcionamento mais perto do ótimo, como também irá evitar custos extra se necessários tratamentos ou remodelações pós construção.

Por estas razões, e porque o bom funcionamento acústico de espaços públicos se tornava cada vez mais uma necessidade, os estudos acústicos relacionados com estações de metro passaram a ser mais concentrados na previsão e nos conceitos gerais de conceção.

No ano de 1997, Altay [26], propõe algumas considerações de planeamento para estações de metro, aborda questões relacionadas com a circulação e orientação espacial, o conforto físico e psicológico, segurança. Faz também uma breve referência ao ruído e à sua importância para um ambiente satisfatório.

Durmisevi, em 1999 [27, 28], também estuda as questões de iluminação, segurança, qualidade do ar e orientação em espaços subterrâneos, neste estudo deixa de fora os aspetos acústicos. No entanto, em 2001, juntamente com Sevil Sariyildiz, aprofunda estes aspetos ligados aos fatores para conforto humano, incluindo o ruído como aspeto a ter em conta no planeamento de espaços subterrâneos, assim como sendo um dos problemas presentes na estação de *Rijswijk*, caso de estudo neste artigo.

As estações de metro são espaços fechados e longos, o que torna difícil a análise acústica. Na tentativa de prever o comportamento acústico destes espaços foram-se desenvolvendo duas abordagens diferentes: investigação com uso de modelos à escala e previsão através de técnicas de modulação computacional. O uso de modelos à escala é um processo bastante moroso, caro e são poucos os estudos aplicados a estações de metro. Kang, em 1996, publicou dois trabalhos: um com vista a averiguar o efeito de vários tratamentos acústicos arquitetónicos com recurso a medições num modelo à escala 1:16 da estação subterrânea de *St. John's Wood* em Londres (Quadro 3.9); e outro que visa a correção e

comparação entre valores obtidos por fórmulas teóricas e modelos de simulação computacional e valores obtidos de modelos à escala e medições *in situ*, com especial atenção para a inteligibilidade da palavra dos vários altifalantes do sistema de aviso público.[29-31]

Quadro 3.9 - Valores de nível de pressão sonora e STI para a estação de *St. John's Wood* (Londres) [adaptado de 30, 31]

	Nível de Pressão Sonora (dB)	STI
Comboio parado	85,0	0,1
Entrada/Saída Comboio	95,0	nulo
Sem comboio	60,0	0,5

Os modelos de previsão computacional são ferramentas que permitem analisar e avaliar propriedades acústicas antes da construção. A arquitetura e o seu processo de escolha de forma e materiais, deve considerar e incluir o dimensionamento acústico, a simulação computacional permite minimizar problemas acústicos futuros e possibilita a avaliação de alternativas num curto espaço de tempo, deste modo torna-se uma ferramenta válida no *design* Acústico e Arquitetónico de salas de concerto, óperas e auditórios de todo o tipo. Quando aplicada a estações de metro ou a espaços semelhantes, como longos corredores, os modelos computacionais têm como prioridade o cálculo de tempo de reverberação e a inteligibilidade da palavra.

No ano de 1997, Kang [31], estudou as características de distribuição e reverberação do som em espaços longos, com recurso a medições em modelos à escala e a testes de articulação desenvolveu um modelo para previsão de parâmetros acústicos em espaços longos.

Lam e Li, em 2004 [32], estudaram também tempos de reverberação e desenvolveram um modelo teórico para recintos longos e retangulares.

Yang e Shield, em 2001 [33], desenvolveram um modelo computacional com recurso a um algoritmo “*Ray Tracing*” para previsão da inteligibilidade em estações com recorte transversal retangular. Também em 2001, Harrison, desenvolveu um método de cálculo para a inteligibilidade de sistemas de aviso público em estações de metro.

Carman, em 2004 [34], desenvolveu um modelo teórico para a previsão do ruído em estações de comboios e o seu efeito na inteligibilidade da palavra.

São também de grande importância, como já referido neste capítulo, os materiais utilizados para correção acústica. Os materiais aplicados nos revestimentos são, juntamente com o volume e a forma do espaço, determinantes para a acústica de estações de metro. Os materiais que revestem as estações não são escolhidos a pensar no comportamento acústico, mas sim tendo em conta vários aspetos relacionados com a segurança. As proporções geométricas das estações de metro, combinadas com o carácter bastante refletivo de materiais como o betão e azulejo dão origem a tempos de reverberação muito longos e a condições adversas para a inteligibilidade da palavra. [35]

No entanto a cuidada escolha e combinação de vários tratamentos arquitetónicos pode melhorar significativamente a inteligibilidade e diminuir a poluição sonora. Para além da escolha dos materiais a escolha do local de colocação dos materiais tem também uma grande importância.

Para melhorar a inteligibilidade da palavra devem ser colocados materiais absorventes nas estações de metro, segundo Kang, para obter uma atenuação maior por parte dos materiais absorventes estes não devem ser distribuídos pela estação, mas sim agrupados na mesma zona. Ou seja, corrigir parcialmente várias paredes resulta numa atenuação sonora menor que corrigir totalmente uma parede. Crockett e Pyke, em 2000, demonstraram que para o mesmo número de absorsores, quando estes estão colocados nas paredes e no teto em vez de só no teto, o tempo de reverberação tende a ser menor e a atenuação sonora maior. No ano de 2004, Shuo-xian e Yue-zhe estudaram a os tratamentos acústicos necessários quando o comboio está no túnel, concluindo que o ruído do comboio pode ser reduzido com recurso a uma secção muito absorvente colocada perto da entrada do túnel. [31, 36, 37]

Os materiais absorventes sonoros tipicamente usados eram geralmente materiais porosos e fibrosos, mas por terem uma natureza frágil, não se adequavam às exigências das estações de metro. No ano de 1997, Kang, estudou a aplicação de membranas absorventes como sistema absorvente não fibroso. Em 1998, Irvine e Richards, estudaram a aplicação de tratamento suspenso no teto sobre as plataformas, estes sistemas com painéis de fibras minerais ou fibra de vidro com resistência ao fogo mostraram-se bastante eficazes para aplicar em estações de metro. Carman, em 2004, examinou a aplicação de massas porosas para projeção. [31, 34, 38]

Sü e Çalışkan, em 2007, tendo como caso de estudo o sistema de metro de Ankara, apresentam um estudo com o objetivo de demonstrar a importância das estratégias iniciais na conceção acústica de estações de metro subterrâneas. Através do estudo de diferentes materiais, tentam encontrar soluções práticas que conduzam a soluções acústicas ótimas em estações de metro. As estações em estudo, Sogutozu, Bilkent e ODTU, foram reproduzidas num modelo de simulação computacional, com a aplicação dos diferentes materiais de revestimento definidos pelo projeto de arquitetura. Foram feitas previsões para os parâmetros de tempo de reverberação (Quadro 3.10), *speech transmission index* (STI) e a distribuição dos níveis sonoros dentro dos espaços (Quadro 3.11), estes valores foram posteriormente comparados com os valores limite especificados por legislação e normas técnicas.[37]

Quadro 3.10 - Valores previstos para o tempo de reverberação por banda de oitava para as estações *Sogutozu*, *Bilkent* e *ODTU* do metro de Ancara [adaptado de 37]

Freq. (Hz)	TR por banda de oitava (s)		
	Sogutozu	Bilkent	ODTU
63	1,30	1,10	1,44
125	1,38	1,20	1,58
250	1,42	1,06	1,28
500	1,48	1,15	1,42
1k	1,42	1,08	1,34
2k	1,30	0,98	1,18
4k	1,10	0,96	1,14
8 k	0,70	0,64	0,72

Quadro 3.11 - Valores previstos para o nível de pressão sonora nas estações *Sogutozu*, *Bilkent* e *ODTU* do metro de Ancara [adaptado de 37]

Freq. (Hz)	Lp com passagem de comboio (dB)	
	<i>Sogutozu</i>	<i>Bilkent / ODTU</i>
63	77,0	84,5
125	79,0	86,5
250	79,0	86,5
500	79,0	86,5
1k	80,0	87,5
2k	77,0	84,5
4k	71,0	78,5
8 k	62,0	69,5

Em 2012, Shimokura e Soeta, investigaram as características do campo sonoro de estações subterrâneas e o efeito provocado pelos materiais de revestimento e a localização da fonte de ruído. O estudo desenrolou-se em duas estações de metro em altura prévia ao seu funcionamento, sendo assim possível efetuar as medições sem passageiros nem comboios. O processo de estudo passou pela instalação de várias fontes sonoras na zona dos carris e um recetor na plataforma, foram comparados dois casos: o caso 1, em que as fontes estavam alinhadas com a zona central da plataforma e com o recetor no centro da plataforma, para simular um comboio a parar no meio da estação; o caso 2, em que as fontes estavam situadas no final da plataforma e início do túnel e com o recetor no fim da plataforma para simular um comboio a entrar ou a sair da estação. Os diferentes materiais das duas estações foram também tidos em conta na comparação dos resultados.[39]

Recentemente a atenção às condições acústicas em estações subterrâneas tem vindo a aumentar, particularmente a nível de requisitos para a inteligibilidade dos sistemas de aviso público. No passado eram usados menos altifalantes com maior potência sonora para cumprir os níveis sonoros exigidos, no entanto torna-se necessário repensar a disposição destes sistemas, de modo a assegurar a inteligibilidade da palavra, principalmente em situações de alarme em que o correto entendimento das indicações dadas pelos sistemas de aviso público é fundamental para a segurança. Processos apenas utilizados para locais de espetáculo começaram a ser utilizados em estações de metro para obter os valores de inteligibilidade da palavra desejados. Este é um dos problemas que Oldfield explicita, em 2012 [40], juntamente com o ruído dos túneis dos sistemas de ventilação para renovação de ar e extração de fumo em casos de emergência.

Em 2012, Zalyaletdinov [41], participou na renovação do sistema de aviso público dos transportes públicos de Estocolmo. A solução proposta foi a colocação de quatro altifalantes dispostos horizontalmente ao longo da plataforma das estações de metro. O comportamento deste novo sistema foi avaliado através do cálculo de índices de inteligibilidade com recurso a *software* de modelação acústica (Quadro 3.12) e foram também efetuadas medições em algumas estações de metro (Quadro 3.13).

Quadro 3.12 - Valores de STI previstos para a estação de *Kungsträdgården* (Estocolmo) através dos *softwares* de modelação acústica CATT-A e ODEON [adaptado de 41]

Pontos	STI (CATT-A)	STI (ODEON)
1	0,67	0,53
2	0,59	0,64
3	0,66	0,72
4	0,56	0,58
5	0,71	0,60
6	0,67	0,55
Média	0,64	0,60

Quadro 3.13 - Valores de STIPA (*Speech Transmission Index for Public Address Systems*) medidos para 17 estações do Sistema de Transporte Público de Estocolmo [adaptado de 41]

Estação	STIPA	Estação	STIPA
<i>Kungsträdgården</i>	0,60	<i>Rissne</i>	0,63
<i>Fridhemsplan</i>	0,61	<i>Rinkeby</i>	0,64
<i>Stadshagen</i>	0,63	<i>Hjulsta</i>	0,61
<i>Rådhuset</i>	0,59	<i>Solna</i>	0,63
<i>Västra skogen</i>	0,63	<i>Nackrosen</i>	0,64
<i>Huvudsta</i>	0,61	<i>Hallonbergen</i>	0,66
<i>Vreten</i>	0,60	<i>Husby</i>	0,64
<i>Sundbyberg</i>	0,62	<i>Akalla</i>	0,61
<i>Duvbo</i>	0,58		

No ano seguinte, Kim e Soeta [42], com recurso a modelos de simulação computacional, investigaram o efeito da variação das dimensões das estações de metro na inteligibilidade do sistema de aviso público. O modelo foi obtido através de modelos *ray tracing* e medições *in situ* de duas estações de metro.

Também foi incluído o estudo de diferentes materiais de revestimento. Concluíram que, para dimensões menores a estação tinha índices de inteligibilidade e níveis de pressão sonora maiores e tempo de reverberação mais curto. Para materiais com maior capacidade de absorção sonora, o índice de inteligibilidade era maior e os níveis de pressão sonora e tempo de reverberação menores. A forma mais eficaz de aumentar o índice de inteligibilidade foi a redução da secção transversal da estação, mais precisamente, a largura e a altura do corredor.

Ainda em 2013, Kim e Soeta [43], apresentaram um estudo sobre os efeitos da reverberação e da difusão do som pelo espaço na inteligibilidade da palavra dos sistemas de aviso público por parte de jovens e pessoas de idade. Nele investigaram a diferente resposta aos sistemas de aviso público de um grupo de 20 pessoas com média de idades de 22 e de um grupo de 20 pessoas com média de idade de 69 anos. Foram efetuados testes experimentais de *word intelligibility* e *listening difficulty* para doze campos sonoros diferentes, simulados para combinar quatro tempos de reverberação e três IACC (*interaural cross-correlation coefficients*). O grupo com maior média de idades mostrou maior dificuldade nos testes devido alguma perda de audição, própria da idade. O fator que mais influenciou a inteligibilidade para ambos os grupos foi o tempo de reverberação.

Também em 2013, Tang, *et al.* [44] levaram a cabo um estudo da estação Xingzhong Road do metro de Xangai. O objetivo do estudo foi a simulação e posterior otimização acústica da estação de metro com recurso a um software de elementos finitos. Os modelos de elementos finitos foram estabelecidos para duas condições de funcionamento comuns da estação de metro, entrada e saída das carruagens. Os níveis de pressão sonora foram calculados e verificados com medições *in situ*, os valores obtidos podem ser observados na Fig. 3.6.

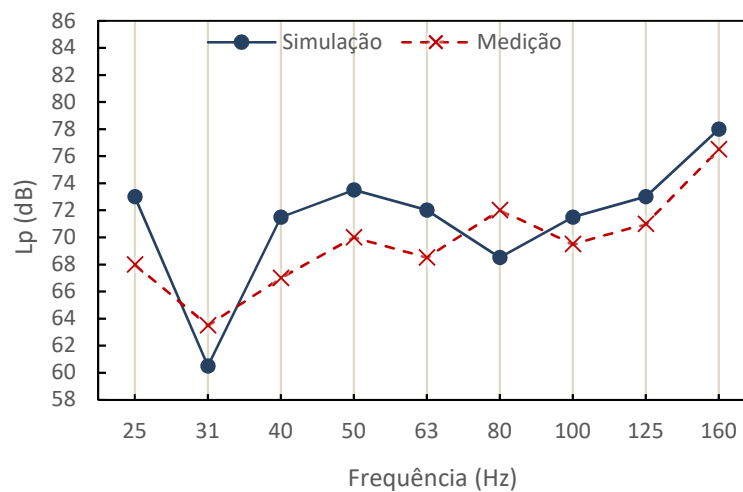


Fig. 3.5 - Comparação dos Níveis de Pressão Sonora simulados e medidos, quando as carruagens estão a entrar da estação de *Xingzhong Road* do metro de Xangai [adaptado de 44]

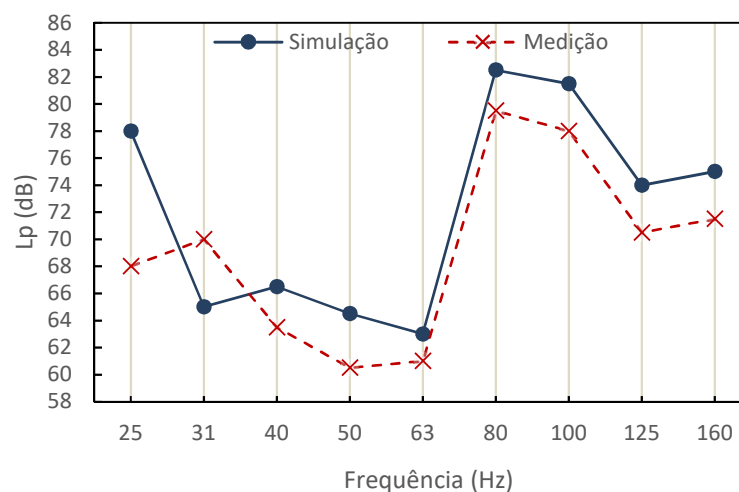


Fig. 3.6 – Comparação dos Níveis de Pressão Sonora simulados e medidos, quando as carruagens estão a sair da estação de *Xingzhong Road* do metro de Xangai [adaptado de 44]

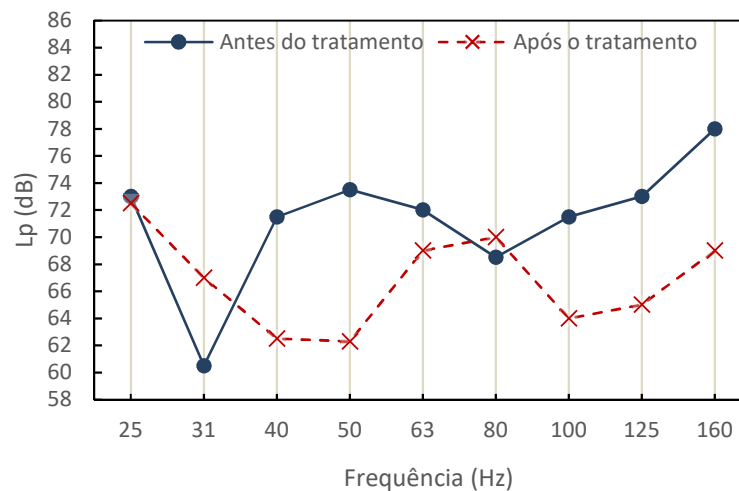


Fig. 3.7 - Comparação dos Níveis de Pressão Sonora simulados antes e depois do tratamento para a estação de *Xingzhong Road* do metro de Xangai [adaptado de 44]

Posteriormente foi feita a otimização acústica dos modelos estabelecidos tendo-se obtido resultados para as novas características (Fig. 3.7), provando-se este método como uma ferramenta eficaz e útil para melhorar o ambiente sonoro e reduzir os malefícios do ruído nos passageiros e trabalhadores em estações de metro subterrâneas.

Luis Gomez-Agustina, *et al.* [45], estudaram um aspeto normalmente desprezado no dimensionamento dos sistemas de aviso público de estações de metro, o efeito da temperatura e humidade do ar. A atenuação do som devido a condições climáticas é regularmente assumida como constante ou desprezável no dimensionamento dos sistemas de aviso público. No entanto, em grandes estações subterrâneas e tendo em vista as frequências médias/altas mais relevantes para a palavra, as variações na atenuação por parte do ar podem ser significantes. O objetivo desta investigação foi então avaliar e quantificar o impacto desta variabilidade da atenuação sonora nos sistemas sonoros de aviso público. Para tal, usaram simulações computacionais para prever o efeito da variação dos parâmetros climáticos. Os resultados deste estudo demonstraram que o aumento da humidade e temperatura levam a um aumento significativo dos valores do tempo de reverberação e consequentemente a um decréscimo dos índices de inteligibilidade da palavra. Deste modo, ficou demonstrado que ignorar os efeitos da temperatura e humidade pode levar a erros de cálculo no dimensionamento dos sistemas de aviso público e a previsões erradas de parâmetros acústicos.

Nos Quadros 3.14, Quadro 3.15 e Quadro 3.16 é feito um resumo dos valores do Ruído de Fundo, Inteligibilidade e Tempo de Reverberação, para várias estações internacionais, de forma a estabelecer pontos de comparação para o caso de estudo desta dissertação.

Quadro 3.14 - Resumo comparativo de valores de Ruído de Fundo para estações de vários países
[14, 15, 22, 24, 31]

Cidade	Descrição da Medição		Nível de Pressão Sonora Médio (dB)
Nova Iorque (EUA)	Tipo A – <i>Old type, single shell, steel car</i> (Ambiente aberto) – medição no Exterior		90,5
	Tipo B – <i>Modern, insulated double shell, steel car</i> (Ambiente aberto)	Interior: Janelas abertas	82,5
		Janelas fechadas	77,5
	Tipo C – <i>New type, insulated double shell, steel car</i> (Ambiente aberto)	Exterior	87,0
		Interior: Janelas abertas	86,5
		Janelas fechadas	82,5
	Tipo D – <i>Insulated double shell, articulated steel car sections</i> (Ambiente aberto)	Exterior	84,0
		Interior: Janelas abertas	80,0
		Janelas fechadas	75,0
	Média dos Níveis de Pressão Sonora medidos para diferentes tipos de Estruturas	Exterior	86,5
		Elevadas	88,2
Chicago (EUA)	Linhas Elevadas	Subterrâneas	94,3
		Dentro das carruagens, para espectro completo	85
		Dentro das carruagens - 400-800 Hz	68
		Na proximidade das carruagens - espectro completo	78
	Linhas Subterrâneas	Na proximidade das carruagens - 400-800 Hz	66
		Dentro das carruagens - completo	95
		Dentro das carruagens - 400 – 800 Hz	91

Chicago (EUA)	Linhas Subterrâneas	Proximidade das carruagens - espectro completo	94	
		Proximidade das carruagens - 400 – 800 Hz	87	
São Francisco (EUA) <i>(Bay Area Rapid Transit System)</i>	Ruído de fundo do sistema de ventilação (antes / depois) de tratamento acústico	grade de saída de ar	92	93
		sala das ventoinhas	104	105
		ponta sul da plataforma	94	90
		a 30 m da ponta sul da plataforma	89	80
		centro da plataforma	81	66
Nova Iorque (EUA)	Média de 57 medições em Plataformas Subterrâneas		93,5	
	Média de 25 medições dentro de Carruagens Subterrâneas		94,9	
	Média de 10 medições em Paragens de Autocarro		84,1	
Londres (Reino Unido)	Medições na estação de <i>St. John's Wood</i>	Comboio parado	85,0	
		Entrada/Saída Comboio	95,0	
		Sem comboio	60,0	
Ancara (Turquia)	com passagem de comboio na <i>estação Sogutozu</i>		78,0	
	com passagem de comboio na <i>estação Bilkent</i>		85,5	
Xangai (China)	com o comboio a entrar na estação de <i>Xingzhong Road</i>		69,6	
	com o comboio a sair na estação de <i>Xingzhong Road</i>		69,1	

Quadro 3.15 - Resumo comparativo de valores de parâmetros de inteligibilidade da palavra para estações de vários países [16, 30, 37, 41, 45]

Cidade	Estação	Medição	Valor
Ancara (Turquia)	Sogutozu	STI	0,79
	Bilkent		0,56
	ODTU		0,73
Toronto (Canadá)	Média de várias carruagens do sistema de transito de Toronto	SIL - Dentro das carruagens em movimento com as janelas fechadas	57-65
		SIL - Dentro das carruagens em movimento com as janelas abertas	66-76
		SIL - Na plataforma da estação com o comboio a chegar	70-75
Londres (Reino Unido)	Estação típica	STI	0,43
			0,48
Estocolmo (Suécia)	Kungsträdgården	STIPA	0,60
	Fridhemsplan		0,61
	Stadshagen		0,63
	Rådhuset		0,59
	Västra skogen		0,63
	Huvudsta		0,61
	Vreten		0,60
	Sundbyberg		0,62
	Duvbo		0,58
	Rissne		0,63
	Rinkeby		0,64
	Hjulsta		0,61
	Solna		0,63
	Nackrosen		0,64
	Hallonbergen		0,66
	Husby		0,64
	Akalla		0,61
Londres (Reino Unido)	St. John's Wood	STI - Comboio parado	0,1
		STI - Entrada/saída do comboio	0
		STI - Sem comboio	0,5

Quadro 3.16 - Resumo comparativo de valores de Tempo de Reverberação para estações de vários países
[22, 29, 37, 45]

Cidade	Estação	Medição	TR (s)	
<i>Ancara</i> (Turquia)	<i>Sogutozu</i>	(63 - 8k Hz)	1,3	
	<i>Bilkent</i>		1,0	
	<i>ODTU</i>		1,3	
<i>São Francisco</i> (EUA)	Estação da BART (Antes/Depois) Do tratamento	(125 - 8k Hz)	7,4	1,4
<i>Hong Kong</i> (Japão)	Estação típica	(500 - 1k Hz)	3,4	
<i>Londres</i> (Reino Unido)	Estação típica Simulação do TR30 20°C	(125 - 8k Hz)		
		HR50%	2,4	
		HR20%	2,2	

4

CASO DE ESTUDO

4.1. METRO DO PORTO

A decisão de adjudicação do projeto do Metro do Porto é tomada em 1997 e entregue ao Agrupamento Complementar de Empresas (ACE) *Normetro*, constituído por oito empresas: *S. C. Soares da Costa*; *ADTRANZ Portugal* e *ADTRANZ Itália* (empresas de equipamento de transporte ferroviário); *ABB Sae* (empresa italiana do grupo *ABB*); *Somague, Engenharia*; *Impregilo* (empresa italiana de construção civil); *Transdev* (empresa operadora de transportes urbanos); e *Semaly* (empresa de engenharia de transportes públicos). [46]

A primeira frente de obra do metro do Porto foi aberta com a instalação do primeiro estaleiro, em Campanhã no ano de 1999. No final do ano 2001 têm início os testes oficiais aos veículos do Metro do Porto. Em junho de 2002 começaram a ser realizadas viagens regulares com passageiros, de forma gratuita e em horário reduzido. A operação comercial do Metro do Porto inicia-se a janeiro de 2003 apenas com a linha A que com o decorrer dos anos sofreu várias expansões. Em 2005 foram inauguradas as linhas B, C e D, posteriormente em 2006 foi aberta a linha E e mais tarde em 2011 principiou o funcionamento da linha F. [47]

O Metro do Porto é atualmente constituído por oitenta e duas estações, sendo que catorze são subterrâneas. Estas estão distribuídas por seis linhas que servem sete concelhos da área metropolitana do Porto: Porto, Maia, Matosinhos, Póvoa de Varzim, Vila do Conde, Vila Nova de Gaia e Gondomar.

Com sessenta e sete quilómetros de extensão é o maior sistema ferroviário ligeiro em Portugal, no entanto apenas cerca de oito quilómetros são em linha subterrânea. O Metro do Porto possui uma frota de 102 unidades constituída por dois tipos de veículos, o modelo *Eurotram* e o modelo *Flexity Swift*, ambos fabricados pela empresa *Bombardier*. O sistema tem capacidade de transportar até nove mil passageiros por hora e por sentido.

Uma característica construtiva da linha de metro que se prende com preocupações acústicas é o tipo de contacto carril-terreno, os carris assentam sobre uma laje flutuante que recebe peças em aço, “almofadadas” com borrachas. [47]

4.2. ESTAÇÕES ANALISADAS

4.2.1. CRITÉRIOS DE ESCOLHA

No âmbito desta dissertação, o estudo acústico das estações de metro está restringido apenas às estações de metro subterrâneas, uma vez que estas têm um comportamento acústico bastante diferente das estações ao ar livre. As estações subterrâneas por serem espaços fechados não permitem que o som se dissipe tão facilmente: As ondas sonoras, ao estarem confinadas, são menos afetadas pela atenuação geométrica e sofrem sucessivas reflexões no espaço tornando o ruído mais forte e diminuindo a inteligibilidade da palavra para os utilizadores das estações.

O objetivo do estudo acústico nestas estações é a medição de alguns parâmetros acústicos, nomeadamente o tempo de reverberação, o RASTI e o ruído de fundo. Estas medições foram efetuadas em três estações.

O sistema do Metro do Porto é constituído por catorze estações subterrâneas. Para escolher quais as três estações onde seriam efetuadas medições foram tidos em conta dois critérios: estações com diferença na geometria arquitetónica, de modo a ser possível tirar algumas conclusões que relacionem os parâmetros acústicos com as dimensões da estação; e estações com baixo tráfego humano, de modo a tornar mais fácil efetuar as medições e para estas serem menos incómodas para os utilizadores do metro.

Após uma visita às estações subterrâneas foi possível dividi-las em três grupos, com o objetivo de escolher uma estação de cada grupo. Estes grupos diferem principalmente no pé direito da plataforma de embarque da estação, isto porque são todas muito semelhantes em comprimento e em largura.

O primeiro grupo tem um pé direito baixo, apenas com altura suficiente para a circulação das carruagens, este engloba as estações de Faria Guimarães, Marquês, Bolhão e São Bento.

O segundo grupo tem um pé direito médio e nele estão incluídas as estações do Heroísmo, Combatentes e Trindade.

O terceiro grupo foi dividido por ter algum elemento arquitetónico de interesse, como uma abertura ou elementos inclinados, inseridos neste grupo estão as estações dos Aliados e Salgueiros.

Depois desta triagem e em reunião com responsáveis do Metro do Porto S.A. ficou decidido que as estações mais fáceis de analisar de cada grupo, por serem menos movimentadas, seriam as estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros. A escolha final contempla assim a estação menos movimentada de cada um dos grupos descritos previamente.

Na Fig. 4.1 é possível observar o mapa da rede do Metro do Porto, neste mapa estão assinaladas com uma cruz as estações escolhidas para análise.

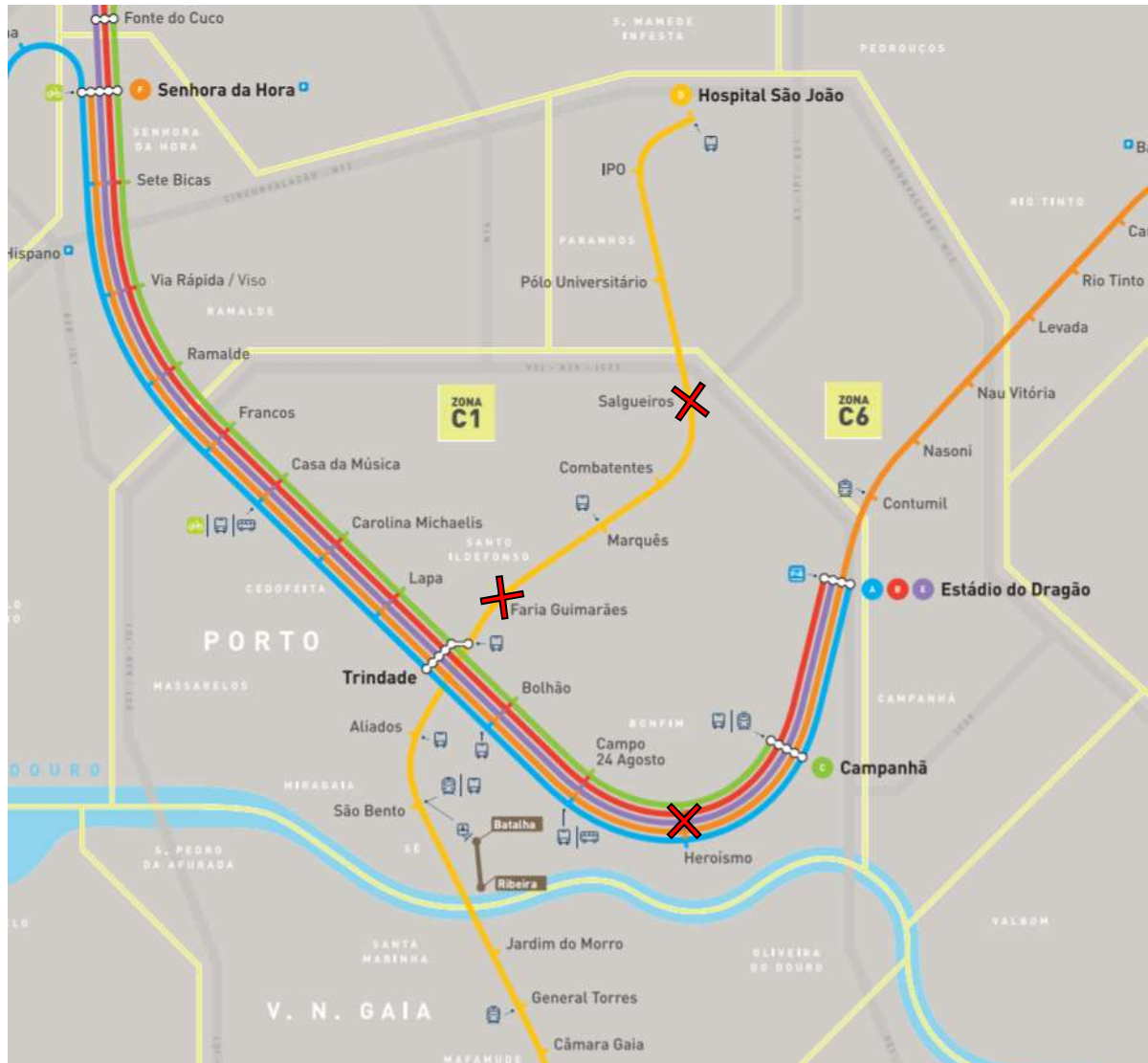


Fig. 4.1 - Mapa da rede do Metro do Porto sinalizando a localização das estações escolhidas para análise [47]

4.2.2. ESTAÇÃO DE FARIA GUIMARÃES

A estação de Faria Guimarães (Fig. 4.2) entrou em funcionamento a 17 de setembro de 2005, aquando da inauguração da linha D, da qual faz parte. Situa-se na freguesia de Paranhos, no Concelho do Porto, a cerca 250 metros da Igreja da Lapa.

A plataforma de embarque tem um pé direito baixo relativamente às outras estações. O revestimento das paredes é em azulejo, característica que se estende a todas as estações analisadas nesta dissertação. O teto da plataforma tem uma forma ondulada como se pode ver na Fig. 4.3. A representação esquemática da planta da plataforma de embarque da estação, assim como as suas dimensões podem ser observadas na Fig. 4.4. A Fig. 4.5 representa a altura da plataforma medida de forma aproximada, com laser de medição, de dez em dez metros.



Fig. 4.2 – Entrada da estação Faria Guimarães (Porto) [foto do autor]



Fig. 4.3 - Plataforma de embarque da estação Faria Guimarães (Porto) [foto do autor]

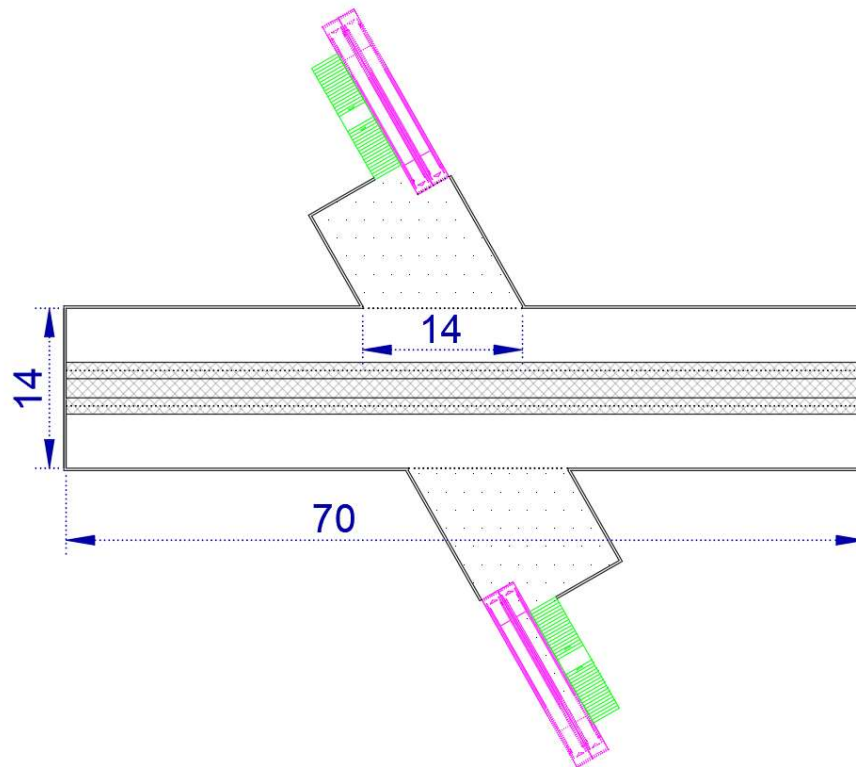


Fig. 4.4 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães (dimensões em metros)

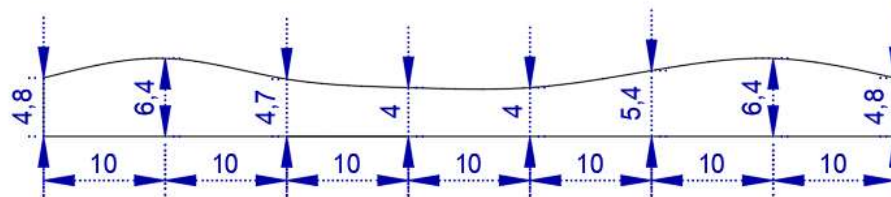


Fig. 4.5 – Corte esquemático da plataforma da estação Faria Guimarães indicando os valores dos pés-direitos (dimensões em metros)

4.2.3. ESTAÇÃO DO HEROÍSMO

A estação do Heroísmo (Fig. 4.6) foi inaugurada a 5 de junho de 2004 e está integrada nas linhas A, B, C, E e F. Está localizada na freguesia de Bonfim, no concelho do Porto, junto à esquadra da PSP de Bonfim e aproximadamente a 300 metros da Escola Secundária Alexandre Herculano.

A plataforma de embarque tem um pé direito médio ligeiramente maior que o da estação Faria Guimarães e é também revestida por azulejo. O teto da estação é em forma de arco, que se prologa por todo o comprimento, tendo uma interrupção na zona central onde existe uma zona mais baixa. Nesta é possível observar os utilizadores da estação que circulam no piso superior (Fig. 4.7). A planta da plataforma de embarque da estação, assim como as suas dimensões podem ser observadas na Fig. 4.8. Uma vez que o teto é em arco, foi medida de forma aproximada a sua altura no eixo médio da plataforma (Fig. 4.9).

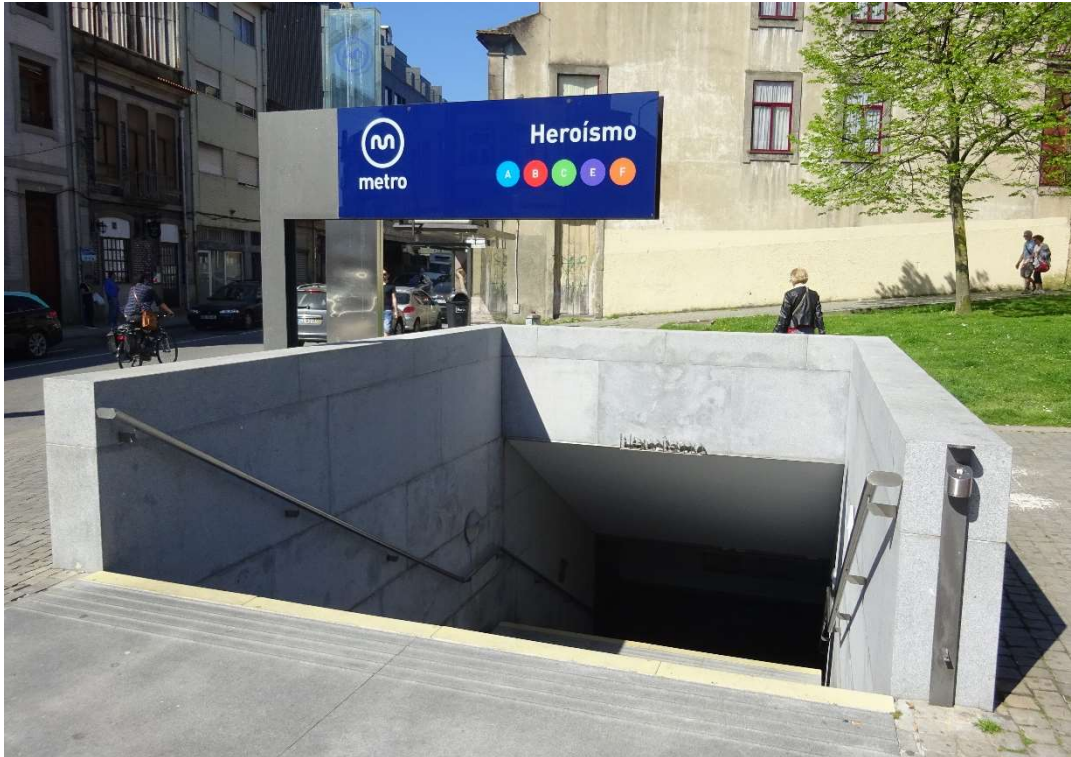


Fig. 4.6 - Entrada da estação Heroísmo (Porto) [foto do autor]



Fig. 4.7 - Plataforma de embarque da estação Heroísmo (Porto) [foto do autor]

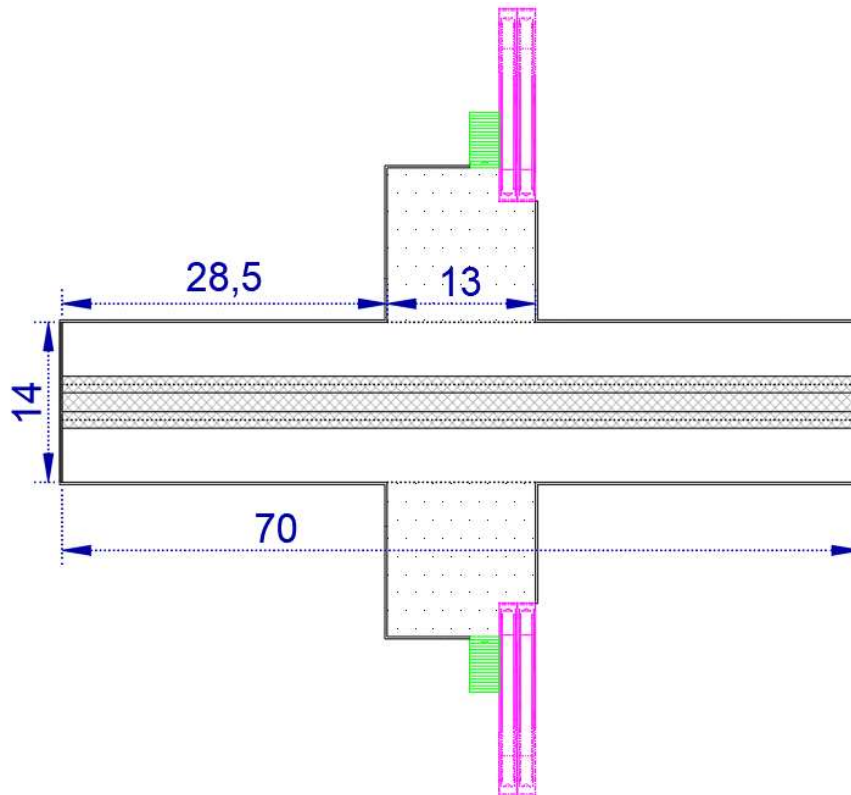


Fig. 4.8 - Planta da plataforma da estação Heroísmo (dimensões em metros)

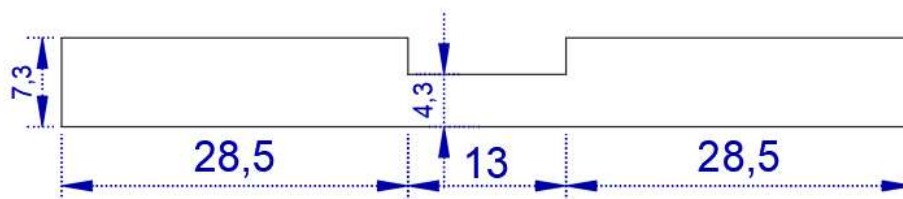


Fig. 4.9 - Corte esquemático da plataforma da estação Heroísmo indicando os valores dos pés-direitos (dimensões em metros)

4.2.4. SALGUEIROS

A estação de Salgueiros (Fig. 4.10) pertence à linha D e foi aberta, à semelhança da estação de Faria Guimarães, a 17 de setembro de 2005 e situa-se na freguesia de Paranhos junto ao local do antigo estádio “Engenheiro Vidal Pinheiro” do S. C. Salgueiros e a 1 km do jardim de Arca d’Água. A estação faz ligação com os autocarros da STCP de forma a servir mais comodamente os alunos das faculdades próximas.

O que diferencia a estação de Salgueiros, é possuir um pé direito comparativamente alto. O teto da plataforma de embarque tem uma forma irregular, com uma clarabóia até à superfície (Fig. 4.11), duas zonas planas com alturas diferentes e uma zona inclinada com uma das partes em acrílico translúcido (Fig. 4.12). Na Fig. 4.13 é possível observar a planta da plataforma de embarque, com as respetivas dimensões. A Fig. 4.14 representa as medições aproximadas dos pés direito da plataforma de embarque.



Fig. 4.10 - Entrada da estação Salgueiros (Porto) [foto do autor]

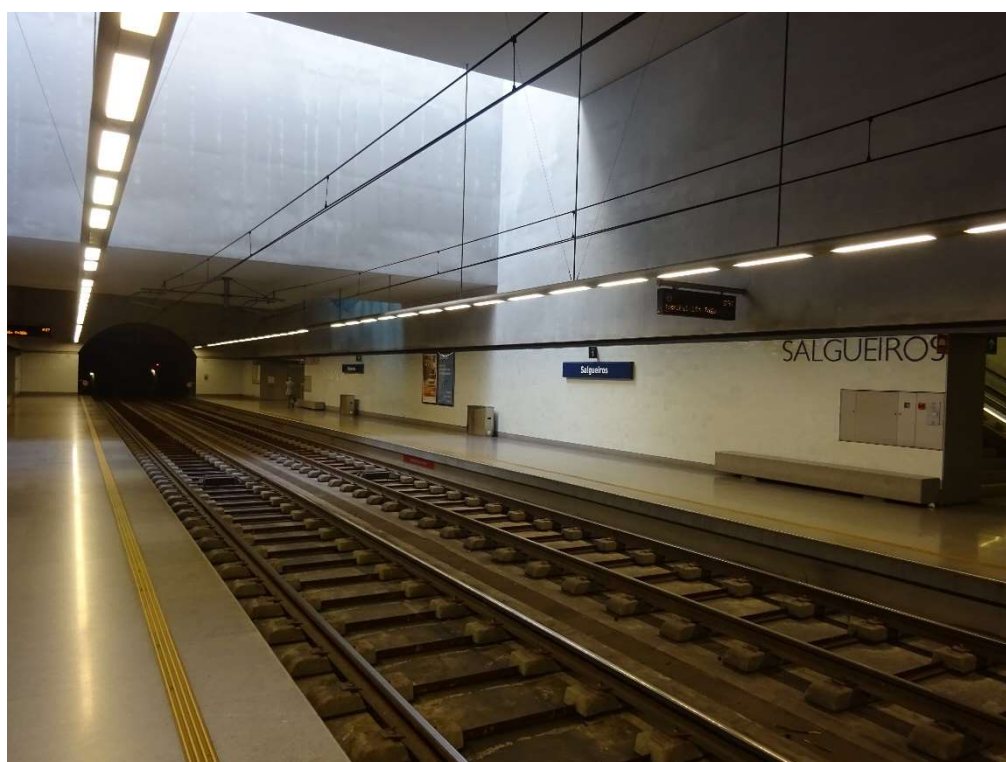


Fig. 4.11 - Plataforma de embarque da estação Salgueiros (vista da claraboia) [foto do autor]

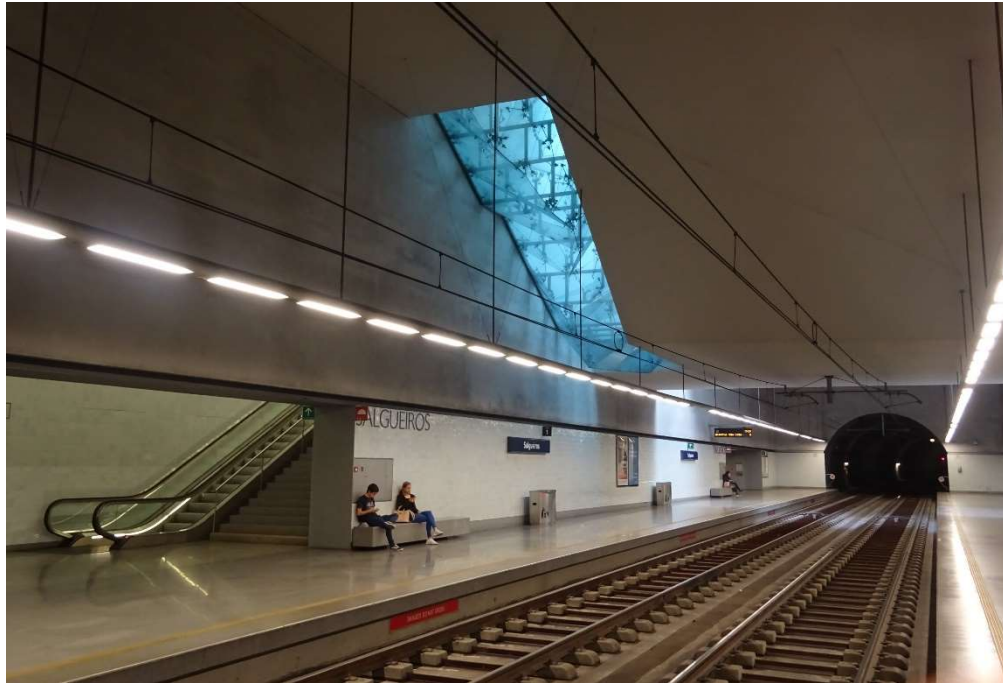


Fig. 4.12 - Plataforma de embarque da estação de Salgueiros (Porto) (com zona em acrílico) [foto do autor]

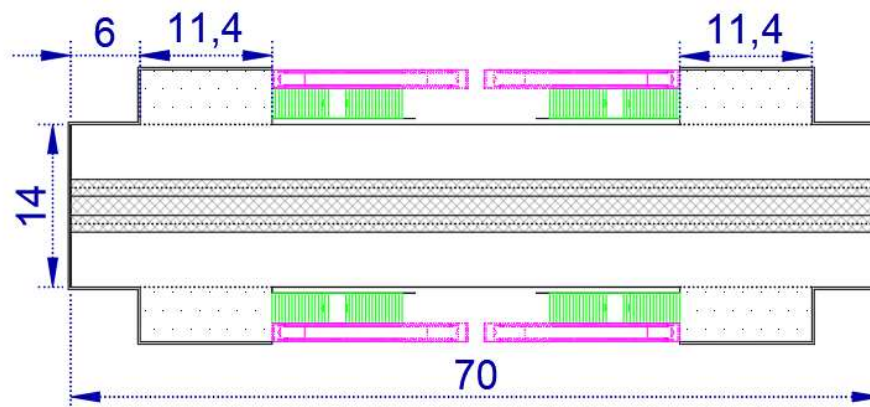


Fig. 4.13 - Planta da plataforma da estação de Salgueiros (dimensões em metros)

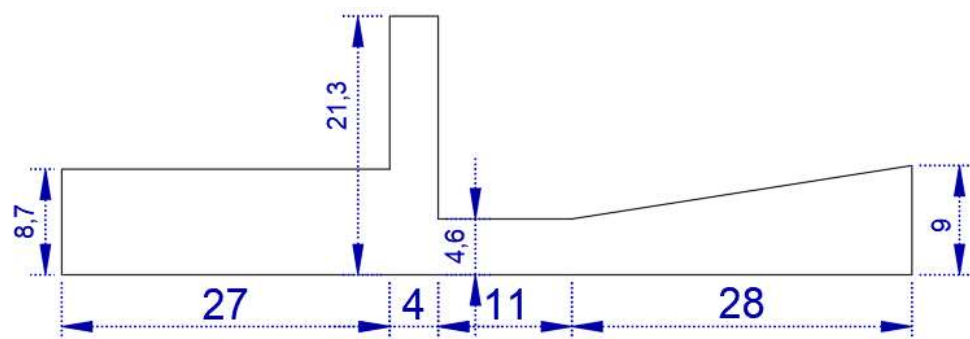


Fig. 4.14 – Corte esquemático da plataforma da estação de Salgueiros indicando os valores dos pés-direitos (dimensões em metros)

5

METODOLOGIA

5.1. PARÂMETROS DE ANÁLISE

5.1.1. RASTI

Como já visto no capítulo 3, um dos maiores problemas acústicos em estações de metro é a capacidade de entender o discurso de outros, seja para quem conversa como para quem escuta um aviso sonoro.

A inteligibilidade da palavra pode ser medida com recurso a vários parâmetros, estando estes divididos em dois grupos, objetivos e subjetivos. O parâmetro usado para esta análise será o RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*), que pertence ao grupo dos objetivos. Este mede a inteligibilidade da palavra para um determinado espaço fazendo uso de um aparelho emissor e de um recetor. O emissor, que se encontra posicionado no lugar de um possível orador, emite um som (do tipo rosa e frequências de 500 e 2000 Hz) que simula as características acústicas da voz humana. Este som vai ser recebido por um microfone omnidirecional ligado à unidade recetora RASTI, que está situada na posição do ouvinte, e que tendo em conta a integridade do sinal que chega e fazendo uma comparação com o sinal que deveria chegar emite um valor numérico (entre 0 e 1). Este método considera assim a influência que outros parâmetros acústicos, como o tempo de reverberação e o ruído de fundo, têm na degradação do sinal emitido. Com este sistema é possível estimar o grau de inteligibilidade da palavra em diferentes posições num mesmo recinto.

5.1.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Devido a preocupações não acústicas, os materiais que revestem as estações de metro são geralmente fracos a absorver som, pois, materiais como betão, azulejo e vidro formam superfícies duras e refletoras. Para agravar esta situação, as plataformas de embarque das estações são espaços compridos e com grande volume. Todos estes fatores tornam as estações subterrâneas de metro locais bastante reverberantes e a medição do Tempo de Reverberação (TR) é utilizado para melhor caracterizar estes espaços.

O TR é o intervalo de tempo, medido em segundos, necessário para que o nível de pressão sonora detetado após o fim da emissão sonora decaia 60 dB. A medição exige uma fonte sonora potente, capaz de emitir energia suficiente em todo o espectro de frequências de modo a assegurar um decaimento suficientemente forte acima do ruído de fundo. Para além da fonte é necessário um aparelho recetor que mede o tempo que passa desde que o som cessa até decair 60 dB. [1]

Um tempo de reverberação alto, nas circunstâncias de uma estação de metro subterrânea, tem influência duplamente negativa.

Primeiramente, aumenta o nível sonoro no espaço, por soma do som refletido ao som direto. As carruagens do metro a chegar à plataforma de embarque causam normalmente ruído forte, bastante incomodativo e nocivo para os utilizadores. Com forte reverberação do espaço, esta situação agravar-se-á.

O segundo efeito negativo prende-se com a inteligibilidade da palavra, um tempo de reverberação alto reduz significativamente a perceção e entendimento do discurso. Isto acontece devido ao baixo nível sonoro de emissão das consoantes e ao seu curto período de duração, desta forma são mascaradas pelo “rasto sonoro” de vogais imediatamente antecedentes, emitidas com nível sonoro mais elevado e maior duração. [1]

5.1.3. RUÍDO DE FUNDO

O ruído de fundo é o conjunto de todos os sons ou ruídos escutados num local. Esses ruídos considerados são normalmente estáveis e contínuos, como por exemplo os dos sistemas de ventilação ou do tráfego de veículos. No caso específico de estações de metro o ruído de fundo é geralmente proveniente das carruagens a circular nos túneis, da entrada e saída das mesmas nas plataformas de embarque, dos vários utilizadores que circulam na estação, da ventilação e das escadas rolantes. Todos estes ruídos interferem na inteligibilidade do som primário produzido no local, sendo neste caso os avisos sonoros.

O ruído de fundo é medido com recurso a um sonómetro, que durante um determinado espaço de tempo avalia o nível sonoro local. Os valores obtidos podem variar bastante com a hora e o dia a que é feita a medição, uma vez que existem dias e horários com mais tráfego humano e maior frequência de comboios.

5.2. REQUISITOS LEGISLATIVOS

A legislação Portuguesa na área da Acústica para o ambiente acústico em terminais de transportes de passageiros, como estações de comboio, estações de metro e aeroportos, é o Regulamento de Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE).

O RRAE [48] estabelece os requisitos acústicos dos edifícios, com vista a melhorar as condições de qualidade acústica dos mesmos. As normas nele presente aplicam-se à construção, reconstrução, ampliação ou alteração dos seguintes tipos de edifícios:

- Edifícios habitacionais e mistos, e unidades hoteleiras (artº 5º);
- Edifícios comerciais e de serviços, e partes similares em edifícios industriais (artº 6º);
- Edifícios escolares e similares, e de investigação (artº 7º);
- Edifícios hospitalares e similares (artº 8º);
- Recintos desportivos (artº 9º);
- Estações de transporte de passageiros (artº 10º);
- Auditórios e salas (artº 10-Aº).

De interesse para esta dissertação é o artigo 10º, Estações de transporte de passageiros. Nesta categoria estão descritos requisitos acústicos aplicáveis às estações de metro subterrâneas. Os requisitos estabelecidos para as estações de transporte de passageiros são os seguintes[48]:

1 - No interior dos átrios ou salas de embarque das estações de transporte de passageiros, de volume superior a 350 m³, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, T, correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, deverá satisfazer as condições seguintes, nas quais V se refere ao volume interior do recinto em causa:

$$a) T_{(500-2k \text{ Hz})} \leq 0,15 \times V^{1/3};$$

$$b) T_{(500-2k \text{ Hz})} \leq 0,12 \times V^{1/3}, \text{ se os espaços forem dotados de sistema de difusão pública de mensagens sonoras.}$$

2 - A determinação do tempo de reverberação deve ser efectuada em conformidade com o disposto na normalização portuguesa aplicável ou, caso não exista, na normalização europeia ou internacional.

3 - Nas avaliações in situ destinadas a verificar o cumprimento dos requisitos acústicos dos edifícios deve ser tido em conta um factor de incerteza, I, associado à determinação das grandezas em causa.

4 - O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis quando o valor obtido para o tempo de reverberação, T, diminuído do factor I no valor de 25 % do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar.

As principais normas Portuguesas com interesse na acústica ambiental e de edifícios e na aplicação prática do RGR e RRAE são as normas: NP ISO 1996-1, NP EN ISO 140, NP EN ISO 717, NP EN ISO 3382-2 e NP EN ISO 16032. [49-53]

O único parâmetro abrangido pelo RRAE para estações de transporte de passageiros é o Tempo de Reverberação. O regulamento não faz referência a nenhum requisito para a inteligibilidade da palavra ou para o ruído de fundo. Deste modo a única norma aplicável é a NP EN ISO 3382-2 – Medição de parâmetros de acústica de salas Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes. [52]

Esta norma especifica métodos de medição do tempo de reverberação em salas correntes e descreve o procedimento de medição, o equipamento necessário, o número de pontos de medição requerido e a metodologia de processamento dos dados e apresentação do relatório de ensaio.

5.3. EQUIPAMENTOS

Para a medição dos parâmetros anteriormente referidos (RASTI, TR e Ruído de Fundo) foram utilizados os seguintes equipamentos:

Na medição do RASTI, que mede a inteligibilidade da palavra recorrendo a um aparelho emissor e a um recetor, foi utilizado o analisador do RASTI, da marca *Brüel & Kjær*, modelo 336, composto pelo emissor modelo 4225 e o recetor modelo 4419 (Fig. 5.1). O emissor é montado num tripé passível de ser colocado onde se desejar simular a fonte sonora, enquanto que o recetor é transportado pelo técnico que executa as medições nos vários pontos do recinto. (Fig. 5.2)



Fig. 5.1 – Pormenor do emissor (esquerda) e do recetor (direita) do RASTI [fotos do autor]



Fig. 5.2 - Fonte sonora e recetor do RASTI [foto do autor]

Para a medição do tempo de reverberação foi utilizado o sonómetro *Brüel & Kjaer*, modelo 2260 (Fig. 5.4), apoiado num tripé, que era deslocado pelo técnico para executar as medições nos vários pontos (Fig. 5.3) e uma fonte sonora *Brüel & Kjaer*, modelo 4224, inclinada a 45° com o piso (Fig. 5.4).

O ruído de fundo foi medido com recurso ao sonómetro *Brüel & Kjaer*, modelo 2260, montado num tripé e colocado em zonas que simulassem a posição de um utilizador da estação (Fig. 5.5).

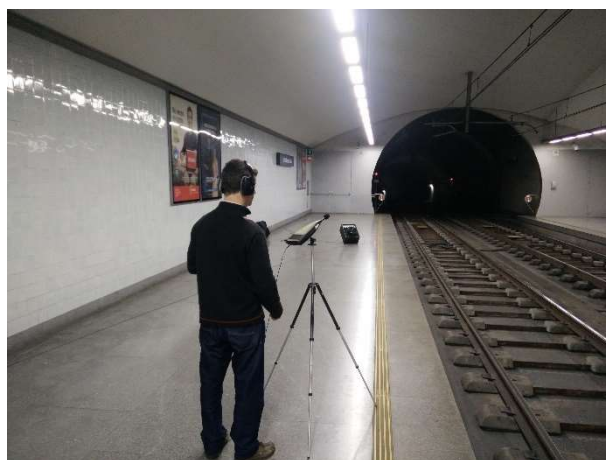


Fig. 5.3 - Fonte sonora e sonómetro para a medição do tempo de reverberação [foto do autor]



Fig. 5.4 - Sonómetro (esquerda) e fonte sonora (direita) [fotos do autor]

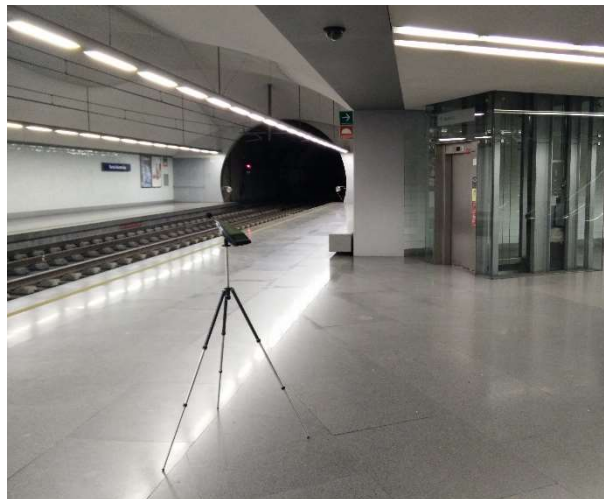


Fig. 5.5 - Sonómetro para a medição do ruído de fundo [foto do autor]

5.4. MÉTODO DE ANÁLISE

5.4.1. CALENDARIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES

Para levar a cabo as medições nas estações de metro já referidas foi necessária autorização por parte da Metro do Porto S. A., uma vez que o equipamento utilizado e a nossa atividade poderiam causar transtorno para os utilizadores. De forma a acertar alguns pontos da colaboração do Metro do Porto com esta dissertação foi marcada uma reunião com responsáveis da empresa, nessa reunião ficaram acordadas as datas e horas dos três ensaios que iriam ser efetuados:

- Dia 26 de Março, às 21H30 Estação de Faria Guimarães;
- Dia 27 de Março, às 21H30 Estação do Heroísmo;
- Dia 28 de Março, às 21H30 Estação de Salgueiros.

Os horários das medições foram escolhidos de modo a coincidir com as alturas de menor afluência de utilizadores, neste caso o que nos foi transmitido pelo Metro do Porto foi para optar pelo horário noturno. No entanto, as medições em todas as estações sofreram atrasos, pois só a partir das 23H00 é que as estações ficavam com número de utilizadores praticamente nulo.

A existência de passageiros na plataforma de embarque tornava muito difícil medir os parâmetros, isto porque para a análise do RASTI é necessário silêncio para os equipamentos poderem chegar a valores fiáveis e porque para a medição do tempo de reverberação é necessário utilizar a fonte sonora a emitir um som forte, algo que poderia causar incómodo às pessoas a utilizar o serviço de metro.

A frequência de passagem do metro também foi algo que requereu bastante atenção para temporizar o início das medições, evitando que as carruagens entrassem na estação durante uma medição.

5.4.2. MEDIÇÃO DO RUÍDO DE FUNDO

O primeiro parâmetro a ser medido em todas as deslocações foi o ruído de fundo, principalmente por ser o mais simples. O único equipamento necessário para executar a medição do ruído de fundo é o sonómetro e este não precisa de um técnico presente para operar, o técnico apenas tem de iniciar a leitura e de terminar passado um determinado tempo. Deste modo, durante este tempo, o resto do material necessário para as outras medições pode começar a ser preparado. Um outro motivo para o ruído de fundo ter sido o primeiro parâmetro analisado foi o facto de este processo ser possível com utilizadores na plataforma de embarque, pois numa estação de metro a conversação entre as pessoas é considerada ruído de fundo.

A primeira estação visitada foi a estação Faria Guimarães, da Linha Amarela (D) Nesta foram feitas três medições de ruído em dois pontos diferentes. Uma vez que a estação é aproximadamente simétrica o ruído de fundo foi apenas medido de um dos lados da plataforma de embarque, neste caso no sentido Faria Guimarães-Santo Ovídio. A planta da plataforma pode ser observada na Fig. 5.6. Esta tem o acesso das escadas e escadas rolantes na zona central, área marcada a pontilhado.

Os dois pontos escolhidos (marcados com um X na Fig. 5.6) tentam simular ouvintes situados junto à linha num dos lados da plataforma e na separação entre a zona de acesso e a plataforma.

O ponto 1, junto à linha, foi utilizado para fazer duas medições:

A primeira medição durou seis minutos, durante um período sem comboio, simulando um utilizador que aguarda a sua viagem, sendo que o ruído era proveniente dos sistemas de ventilação, das conversas entre os utilizadores, de um tubo de queda de água situado no túnel da estação e das escadas rolantes;

A segunda medição durou um minuto e quarenta segundos, e funcionou durante a totalidade da passagem do comboio na plataforma de embarque, incluindo chegada, abertura e fecho de portas e partida. Durante este tempo e com comboio estacionário continuava a ser possível ouvir os ruídos descritos para a primeira medição.

O ponto 2, na separação entre a zona de acesso e a plataforma, foi escolhido para simular a presença de utilizadores que acabam de entrar na plataforma e para contabilizar o efeito bastante presente do ruído da escada rolante, que foi imediatamente notório desde a chegada à plataforma. Neste ponto foi apenas feita uma medição, a terceira e última para o ruído de fundo nesta estação. Teve a duração de oito minutos e trinta segundos e teve como ruídos mais presentes, as escadas rolantes, o tudo de queda de água, as conversas entre os utilizadores e uma ocasional abertura das portas do elevador, situado na zona de acesso.

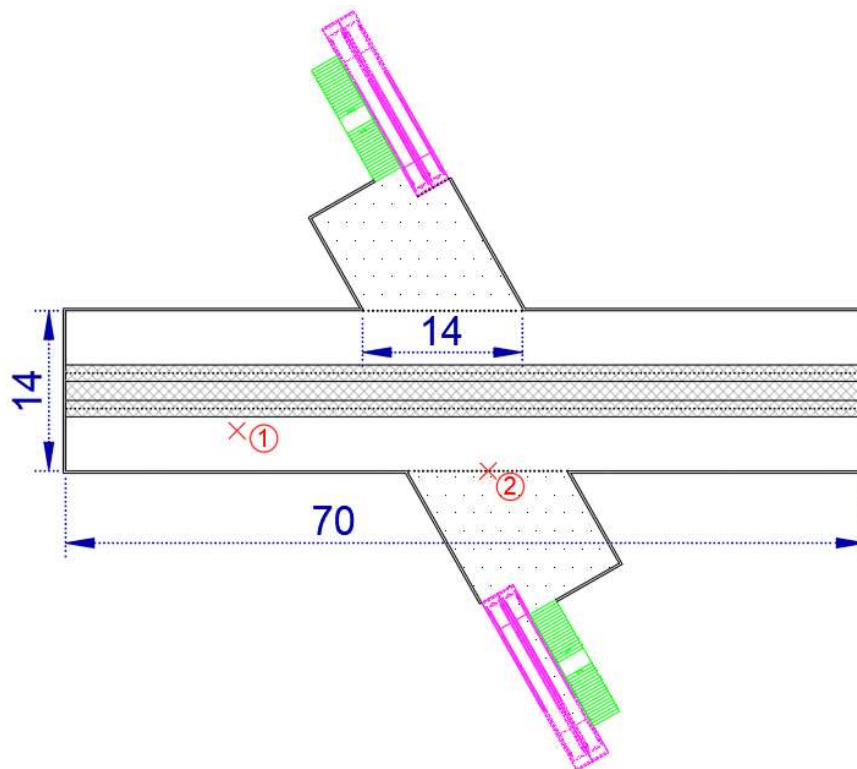


Fig. 5.6 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães com sinalização dos dois pontos utilizados para a medição do ruído de fundo (dimensões em metros)

A segunda estação a ser medida foi a estação de Heroísmo, pertencente às linhas A, B, C, E e F, para esta estação foram efetuadas quatro medições em dois pontos distintos. À semelhança da estação de Faria Guimarães, também esta é simétrica, deste modo o ruído foi apenas medido de um dos lados da plataforma de embarque, mais especificamente no sentido Heroísmo-Senhor de Matosinhos. A planta da plataforma pode ser observada na Fig. 5.7, esta tem o acesso das escadas e escadas rolantes na zona central, área marcada a pontilhado.

Os pontos escolhidos (marcados com um X na Fig. 5.7), são coerentes com os pontos escolhidos na estação Faria Guimarães, tentando também retratar utilizadores junto à linha e na transição entre a zona de acesso e a plataforma. No ponto 1 foram efetuadas três medições:

A primeira medição demorou cerca de um minuto, durante a passagem do comboio que circulava na linha mais próxima da zona de medições;

A segunda medição foi semelhante à primeira e durou um minuto também, analisou o ruído de fundo durante a passagem do comboio, mas desta vez quando este circulava na linha mais distante do local de medições;

A terceira medição foi mais demorada, com cerca de oito minutos e analisou o ruído sem presença de comboios na estação. O ruído era neste caso originado nos sistemas de ventilação, nas conversas entre os utilizadores, nas escadas rolantes e nesta estação verificava-se também a existência de um tubo queda de água, não no início do túnel como na estação de Faria Guimarães, mas na linha aproximadamente no centro da estação e com intensidade mais baixa.

A quarta medição foi efetuada no ponto 2, situado entre o acesso às escadas e a plataforma. Teve uma duração de três minutos, durante este espaço de tempo não houve passagem de comboios. Nesta estação estava também muito presente o ruído das escadas rolantes.

Na Fig. 5.8 é possível ver um instantâneo do decorrer da medição do ruído de fundo na estação Heroísmo.

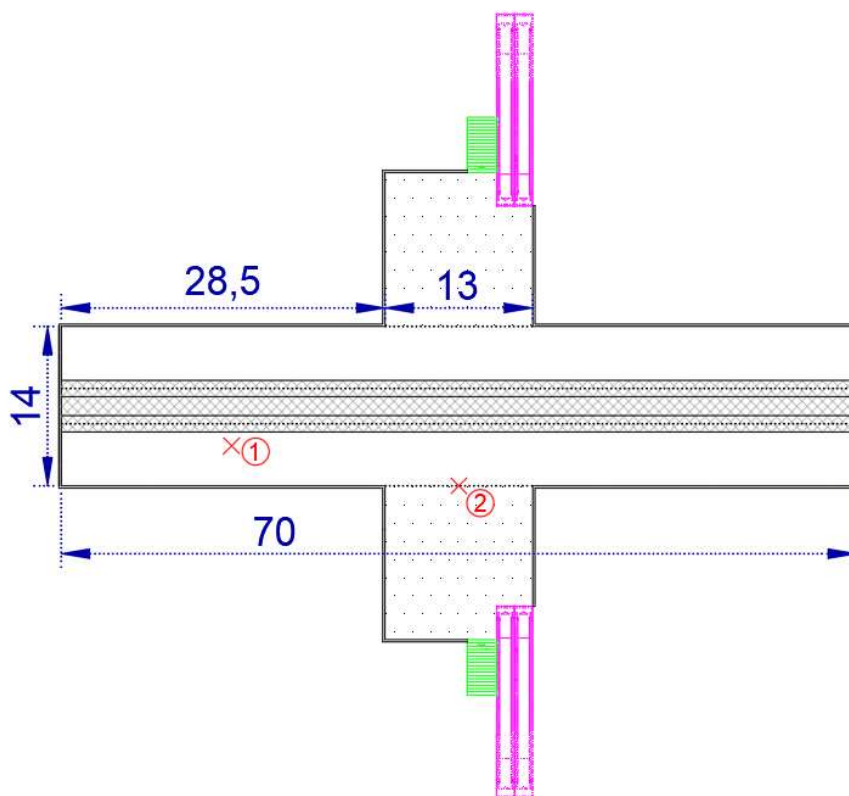


Fig. 5.7 - Planta da plataforma da estação Heroísmo com sinalização dos dois pontos utilizados para a medição do ruído de fundo (dimensões em metros)



Fig. 5.8 - Medição do ruído de fundo na estação Heroísmo (zona de transição entre acesso às escadas e a plataforma) [foto pelo autor]

A última estação a ser analisada foi a estação de Salgueiros, incluída na Linha Amarela (D). Esta difere das outras estações por ter um teto com uma forma menos homogênea e por possuir duas zonas de acesso às escadas rolantes ao invés de apenas uma. Nesta estação, de forma a continuar a metodologia de medições até aqui praticada, foram efetuadas quatro medições em dois pontos distintos. O lado da plataforma de embarque escolhido para a análise foi o do sentido Salgueiros-Santo Ovídio. A planta da plataforma pode ser observada na Fig. 5.9, esta tem dois acessos das escadas e escadas rolantes em cada uma das pontas da plataforma, áreas marcadas a pontilhado.

Os dois pontos escolhidos (marcados com um X na Fig. 5.9) tentam simular ouvintes situados junto à linha na zona central da plataforma e na separação entre uma das zonas de acesso e a plataforma.

Com o sonómetro colocado no ponto 1 foram efetuadas três medições:

A primeira medição durou cerca de três minutos, neste espaço de tempo não houve passagem de nenhum comboio, sendo que o ruído era apenas proveniente das conversas entre os utilizadores e das escadas rolantes, não existindo nenhum tubo de queda de água. De notar que nesta estação, Salgueiros, a sensação acústica era notoriamente mais agradável;

A segunda medição teve cerca de um minuto e captou o ruído de fundo durante a passagem do comboio na estação;

A terceira medição demorou dois minutos e analisou o ruído de fundo durante a passagem de dois comboios em simultâneo na estação.

No ponto 2 foi efetuada a quarta medição, esta durou 8 minutos não tendo passado nenhum comboio durante esse espaço de tempo. O ruído presente nesta última medição provinha apenas dos utilizadores e dos equipamentos.

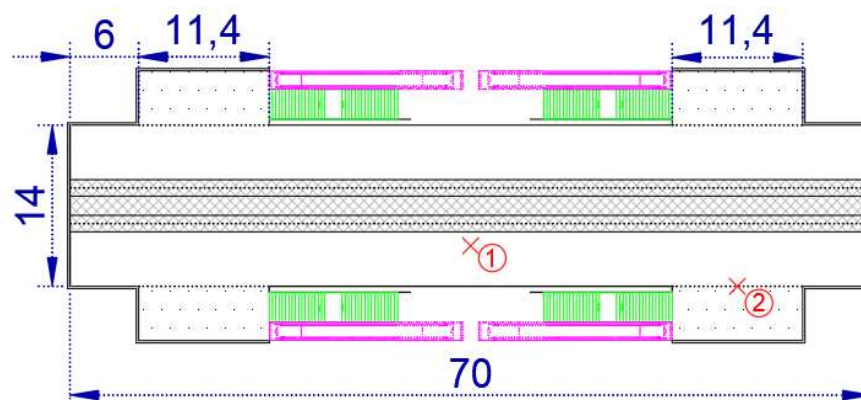


Fig. 5.9 - Planta da plataforma da estação Salgueiros com sinalização dos dois pontos utilizados para a medição do ruído de fundo (dimensões em metros)

5.4.3. MEDIÇÃO DO RASTI

O segundo parâmetro medido nas estações de metro foi o RASTI. Este parâmetro não foi simples de medir, devido a ser muito sensível ao ruído de fundo. O ruído proveniente dos equipamentos não era suficiente para impedir a análise do RASTI, mas aliado ao ruído das conversas entre utilizadores não permitia aos equipamentos obter valores, era apresentada uma mensagem de erro no mostrador do equipamento. Por este motivo, os valores de RASTI só eram passíveis de ser medidos nas alturas em que a plataforma não tinha praticamente ninguém. Para agravar a situação, ainda era necessário temporizar as chegadas dos comboios.

O RASTI foi medido em oito pontos distintos para as três estações de metro em análise, sendo que o valor de cada ponto foi obtido pela média de três leituras. Por todas as estações serem aproximadamente simétricas procedeu-se ao estudo deste parâmetro apenas num dos lados da estação, tal como na análise do ruído de fundo. Os pontos de medição estão divididos em quatro pares dispostos ao longo da plataforma, cada par tem os seus dois pontos lado a lado, sendo que um deles fica situado junto à linha e o outro junto à parede lateral da plataforma. Esta distribuição pretende simular os vários possíveis locais da plataforma onde os utilizadores do metro podem aguardar pela sua viagem.

Na primeira estação, Salgueiros, a distribuição dos pares de pontos para a análise do RASTI pode ser vista na Fig. 5.9, ficando o equipamento emissor aproximadamente a meio do primeiro terço de plataforma, o par de pontos 1 entre o emissor e o início da abertura de acesso às escadas, o par 2 no início dessa abertura, o par 3 no final da abertura de acesso às escadas e o par de pontos 4 entre o par 3 e o fundo da plataforma. A Fig. 5.11 ilustra o processo de medição do parâmetro RASTI na plataforma de embarque da estação de metro Faria Guimarães.

A estação Heroísmo foi a segunda a ser analisada, regendo-se por uma distribuição dos pares de pontos exatamente igual à de Faria Guimarães. A planta da plataforma com a distribuição dos pontos pode ser observada na Fig. 5.12.

A terceira estação a ser medida foi a de Salgueiros, a distribuição dos pares de pontos para análise desenvolve-se de forma ligeiramente diferente, como se pode ver na Fig. 5.13, uma vez que esta possui duas zonas de acesso à plataforma. Desta forma, o equipamento emissor fica situado a meio da primeira zona de acesso à plataforma, o par de pontos 1 fica entre o emissor e o centro da plataforma, o par 2 fica no centro da plataforma, os pares de pontos 3 e 4 ocupam posições homólogas ao par 1 e ao emissor, respetivamente.

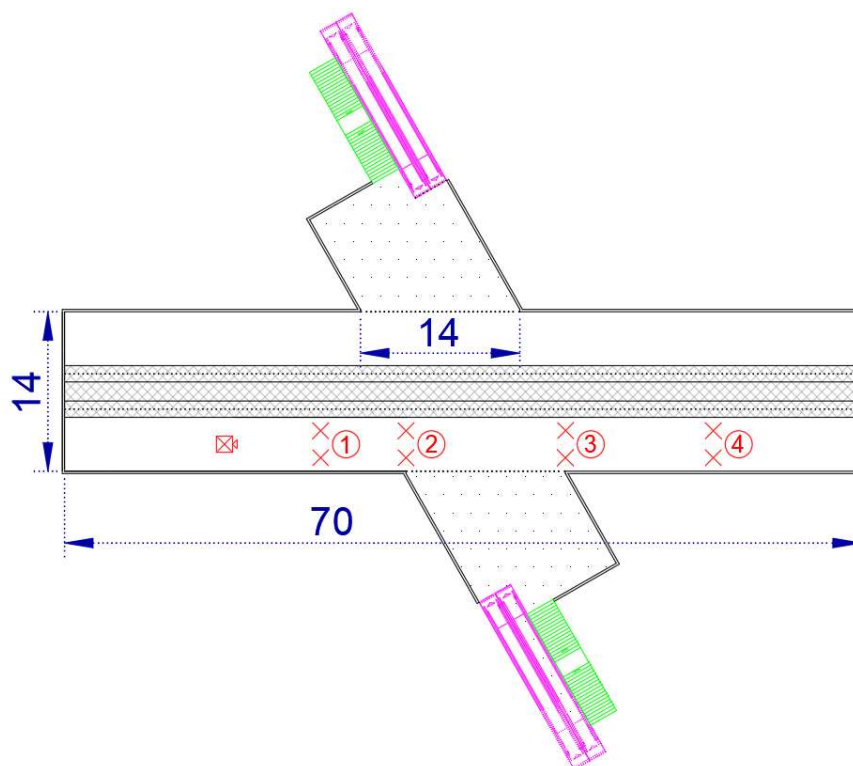


Fig. 5.10 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do RASTI (dimensões em metros)



Fig. 5.11 - Medição do parâmetro RASTI na plataforma de embarque da estação de metro Faria Guimarães [foto pelo autor]

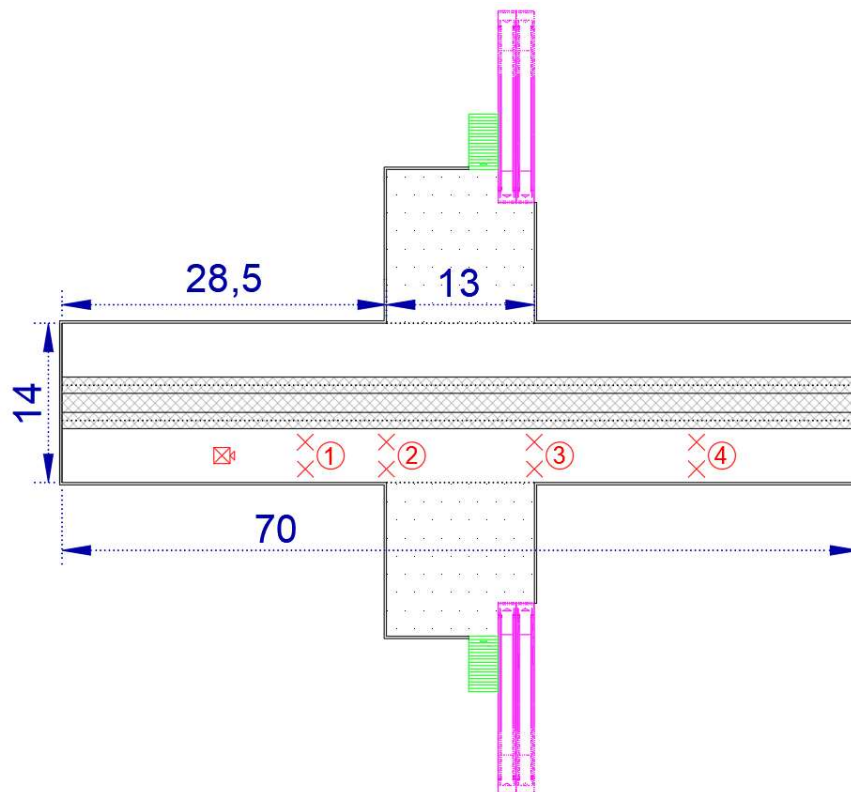


Fig. 5.12 - Planta da plataforma da estação Heroísmo com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do RASTI (dimensões em metros)

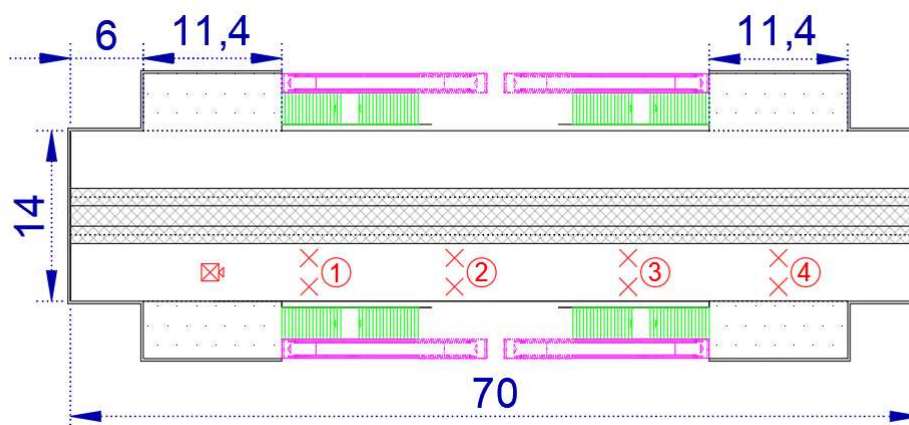


Fig. 5.13 - Planta da plataforma da estação Salgueiros com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do RASTI (dimensões em metros)

5.4.4. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O último parâmetro acústico medido foi o tempo de reverberação (TR). Nas visitas efetuadas às estações este ensaio foi sempre deixado para último por ser demasiado incomodativo para os utilizadores. O processo de medição requer uma fonte sonora com capacidade de emitir um ruído branco intenso. Durante a emissão desse ruído o nível de pressão sonora na plataforma de embarque sobe de forma acentuada. Para os técnicos a executar as medições é recomendado o uso de protetores de ouvido, mas os utilizadores do metro que não possuem qualquer tipo de proteção auricular não podem ser sujeitos a tal experiência. Por esta razão, este ensaio só era possível ser realizado nas alturas em que a plataforma estava deserta ou com no máximo duas pessoas, mas situadas na ponta da plataforma oposta à fonte sonora.

O TR é o intervalo de tempo, medido em segundos, necessário para que o nível de pressão sonora detetado após o fim da emissão sonora decaia 60 dB, no entanto, devido às condições acústicas do local não foi possível medir o decaimento de 60 dB. O ruído de fundo provocado pelos equipamentos de ventilação, pelas escadas rolantes e pelo tubo de queda de água existente nas duas primeiras estações era demasiado intenso para se conseguir analisar todo o decaimento do sinal sonoro emitido pela fonte na medição do TR. Seguindo uma prática comum em medições de tempo de reverberação, foi considerado um decaimento de apenas 30 dB. Deste modo, o sonómetro analisa o decaimento do sinal sonoro até este diminuir 30 dB e posteriormente faz uma extrapolação para simular o tempo de decaimento de 60 dB. Este parâmetro assim calculado tem a nomenclatura TR_{30} e foi o medido em todas as estações em estudo.

O tempo de reverberação foi medido oito vezes em cada estação. Mais especificamente em quatro pontos distintos com o sonómetro orientado em duas direções diferentes em cada ponto. De forma semelhante à medição dos parâmetros anteriores, o TR_{30} foi apenas medido de um dos lados da plataforma. Os quatro pontos de medição localizam-se ao longo da plataforma, e as direções do sonómetro aproximadamente $+45^\circ$ e -45° em relação à fonte sonora. Esta abordagem, como já visto para os parâmetros anteriores, tenta simular diferentes posições que os utilizadores da estação de metro podem tomar. Em todas as estações as medições do TR_{30} seguiram a ordem: ponto 1 (rodado direita), ponto 1 (rodado esquerda), ponto 2 (rodado direita), ponto 2 (rodado esquerda) e assim sucessivamente terminando no ponto 4 (rodado esquerda).

Para a primeira estação a ser analisada, a estação Faria Guimarães, a distribuição dos pontos pode ser observada na Fig. 5.14, sendo que a fonte sonora estava localizada a meio do primeiro terço da plataforma, o ponto 1 entre a fonte e o início da zona de acesso às escadas, o ponto 2 no início da zona de acesso às escadas, o ponto 3 no final da zona de acesso às escadas e o ponto 4 a meio do último terço da plataforma. Os pontos 1 e 4 ficam mais próximos da linha enquanto os pontos 2 e 3 estão localizados junto à parede da plataforma, esta diferença de posição foi escolhida de modo a isolar a possível contribuição para o tempo de reverberação das zonas de acesso às escadas. A Fig. 5.15 mostra o decorrer do processo de medição do parâmetro TR_{30} na plataforma de embarque da estação de metro Faria Guimarães.

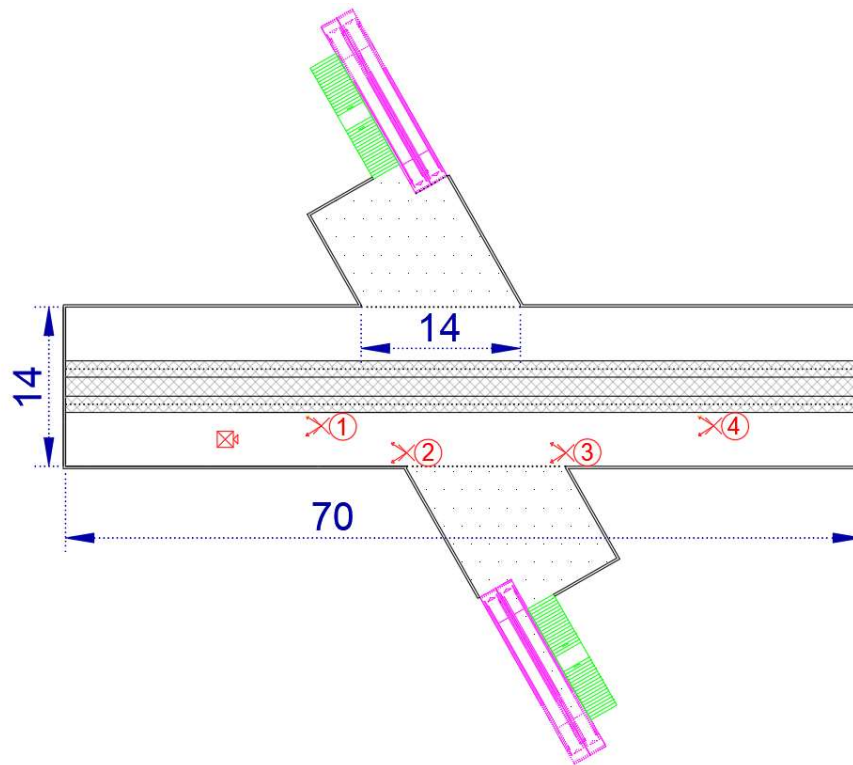


Fig. 5.14 - Planta da plataforma da estação Faria Guimarães com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do Tempo de Reverberação (dimensões em metros)

Para a estação de Heroísmo, segunda a ser analisada, a distribuição dos pontos de medição foi igual à da estação Faria Guimarães. A planta da plataforma de embarque com a disposição dos pontos de medição pode ser vista na Fig. 5.16.

Para a estação de Salgueiros, que difere das outras por ter mais uma zona de acesso à plataforma, a disposição dos pontos de medição foi semelhante às anteriores. Neste caso, a zona de acesso à plataforma não se localiza a meio da estação, mas sim nos topos. Para manter coerência com os pontos escolhidos nas outras estações, optou-se por manter as posições relativas entre os pontos, sendo que os pontos 2 e 3 deixaram de estar junto das zonas de acesso e passam agora a estar numa zona corrente da plataforma. A planta da plataforma de embarque da estação Salgueiros com a distribuição dos pontos está representada na Fig. 5.17

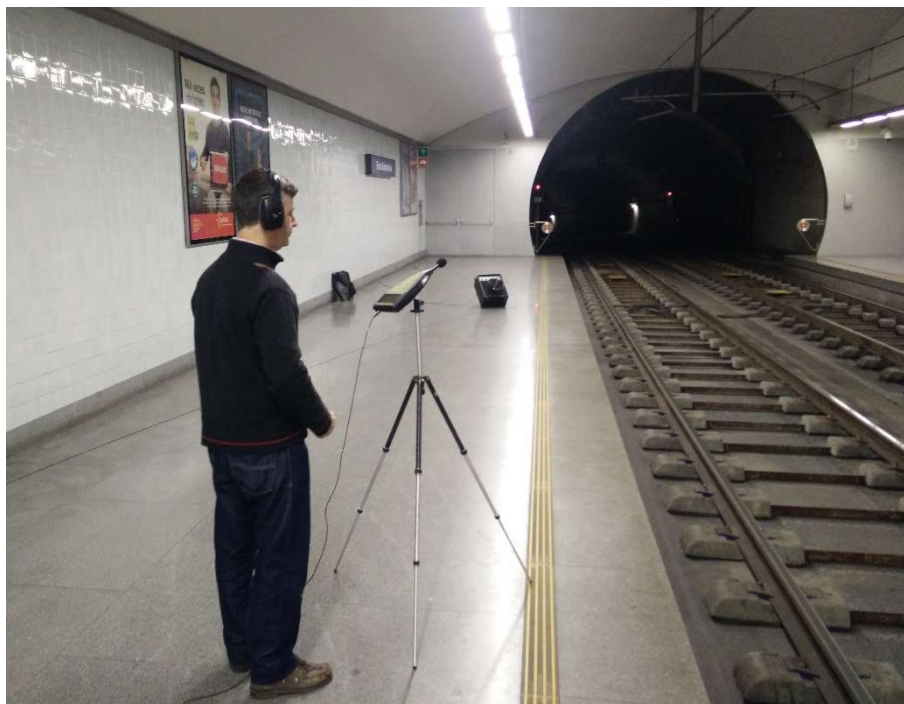


Fig. 5.15 - Medição do Tempo de Reverberação na plataforma de embarque da estação Faria Guimarães [foto pelo autor]

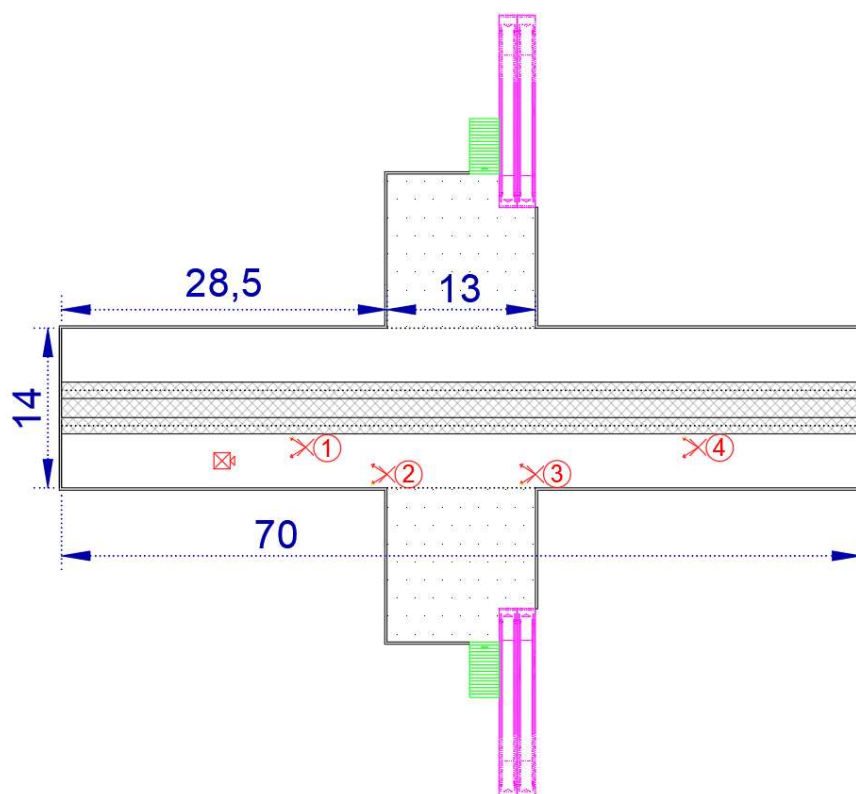


Fig. 5.16 - Planta da plataforma da estação Heroísmo com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do Tempo de Reverberação (dimensões em metros)

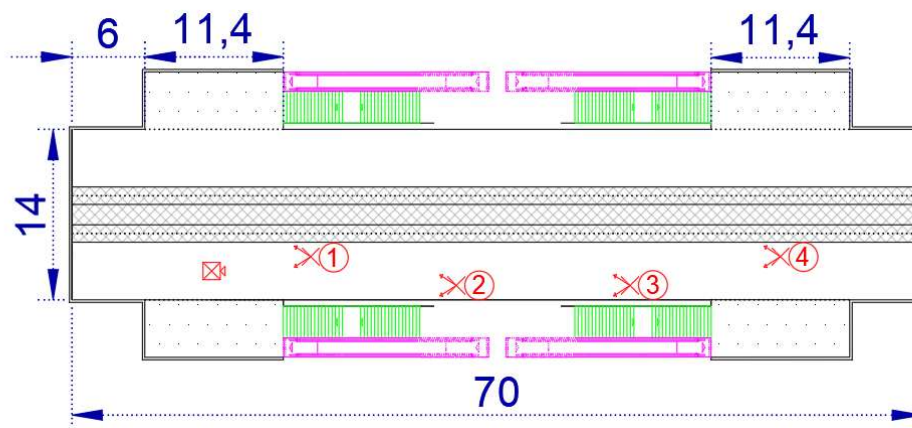


Fig. 5.17 - Planta da plataforma da estação Salgueiros com sinalização dos quatro pontos utilizados para a medição do Tempo de Reverberação (dimensões em metros)

5.4.5. RESUMO DA METODOLOGIA

O método de análise utilizado para as três estações pode ser resumido pelos Quadros Quadro 5.1 e Quadro 5.2. De forma semelhante para todas as estações, o ruído de fundo foi analisado com recurso a dois pontos, o RASTI foi medido em 8 pontos (média de 3 leituras) e o TR foi analisado com 2 medições em cada um dos 4 pontos.

Quadro 5.1 - Resumo dos pontos de medição para os três parâmetros analisados e para as três estações

Estação	Ruído de Fundo (RF)	RASTI	Tempo de Reverberação (TR)
Faria Guimarães	2 pontos	8 pontos	4 pontos
Heroísmo			
Salgueiros			

Quadro 5.2 - Resumo dos tempos de medição ou número de medições para os três parâmetros analisados e para as três estações

Estação	Ruído de Fundo (RF)	RASTI	Tempo de Reverberação (TR)
Faria Guimarães	1º medição – 6min 14s 2º medição – 1min 37s 3º medição – 8min 36s	3 leituras para cada uma das 8 medições	8 medições
Heroísmo	1º medição – 8min 4s 2º medição – 1min 1s 3º medição – 1min 19s 4º medição – 3min 13s		
Salgueiros	1º medição – 3min 2s 2º medição – 1min 15s 3º medição – 2min 2s 4º medição – 8min 30s		

6

RESULTADOS

6.1. APRESENTAÇÃO, COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1.1. RUÍDO DE FUNDO

6.1.1.1. Faria Guimarães

Os resultados da medição do ruído de fundo na estação de Faria Guimarães podem ser observados na Fig. 6.1, onde o parâmetro ilustrado é o nível sonoro contínuo equivalente (L_{Aeq}), para os seguintes casos de medição: no ponto 1 sem nenhum comboio a passar pela plataforma de embarque; no ponto 1c com a passagem de um comboio; e no ponto 2 (mais próximo do acesso às escadas) sem passagem de nenhum comboio. Os valores obtidos foram 47,6 dB(A) para o primeiro caso, 76,6 dB(A) para o segundo e 58,4 para o terceiro caso.

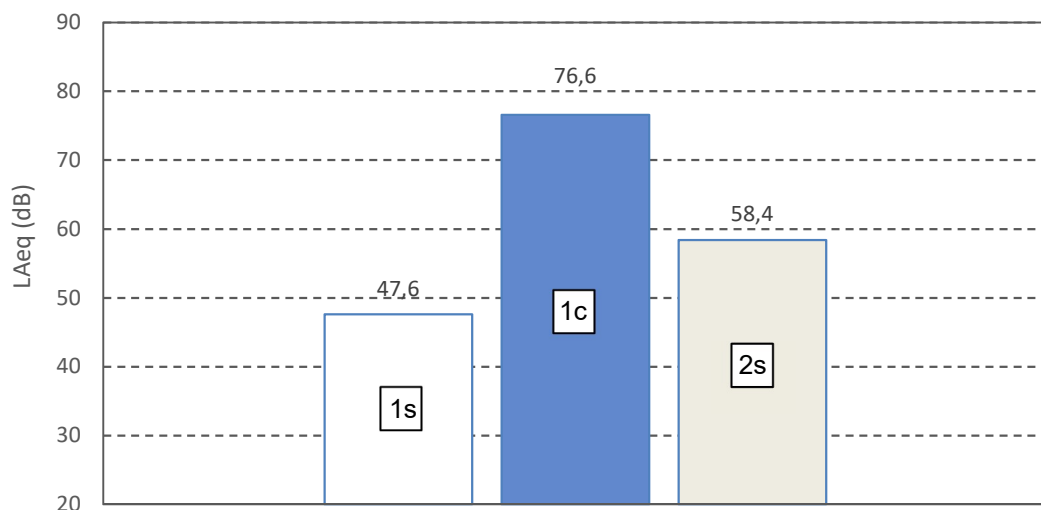


Fig. 6.1 - Valores do Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}) para os três casos de medição do ruído de fundo na estação Faria Guimarães (1s – pt.1 sem comboio; 1c – pt.1 com comboio; 2s – pt.2 sem comboio)

O nível sonoro equivalente permite ter a perceção do ruído de fundo nas estações de metro, pois reduz a um valor equivalente todos os valores medidos durante o espaço de tempo da medição. Outros parâmetros com interesse para a caracterização do ruído são os níveis sonoros estatísticos, que traduzem o nível sonoro que foi ultrapassado para uma percentagem do tempo, neste caso, estão representados no Quadro 6.1 os valores para 5%, 50% e 95%.

Estes permitem tirar algumas conclusões sobre a homogeneidade do ruído no tempo. Por exemplo, para o ponto 1 sem comboio, em 5% do tempo o nível sonoro foi superior a 50 dB(A) e em 95% do tempo o nível sonoro foi superior a 46 dB(A), daqui pode concluir-se que não houve nenhum evento sonoro com energia significativamente superior. Em contraste aparece a segunda medição, no ponto 1, mas desta vez com a passagem de um comboio, em que os valores do L_{A5} e do L_{A95} diferem em cerca de 20 dB, indicando que entrada ou a saída do comboio na plataforma de embarque da estação tem um forte impacto no ruído. No Quadro 6.1 também podem ser verificados os tempos de medição para cada um dos casos.

Quadro 6.1 - Níveis sonoros estatísticos para os três casos de medição do ruído de fundo na estação Faria Guimarães

Caso de medição	L_{A5} (dB)	L_{A50} (dB)	L_{A95} (dB)	Tempo de medição (min:seg)
1s - Ponto 1 sem comboio	50,0	46,8	46,0	06:14
1c - Ponto 1 com comboio	82,8	74,0	63,8	01:37
2s - Ponto 2 sem comboio	63,4	56,4	51,6	08:36

6.1.1.2. Heroísmo

A medição do ruído fundo para a segunda estação (Heroísmo), seguiu uma metodologia semelhante, tendo como única diferença a adição de um caso de medição. Como já descritos no capítulo anterior, os casos de medição são: no ponto 1 sem nenhum comboio a passar pela plataforma de embarque; no ponto 1 com a passagem de um comboio na linha mais próxima do lado onde se encontrava o sonómetro; no ponto 1 com a passagem de um comboio na linha mais afastada do lado onde se encontrava o sonómetro; e no ponto 2 (mais próximo do acesso às escadas) sem passagem de nenhum comboio. Os valores do nível sonoro equivalente estão expostos na Fig. 6.2, com valores de 57,1 dB(A), 84,0 dB(A), 83,5 dB(A) e 62,1 dB(A) para o primeiro, segundo, terceiro e quarto caso, respetivamente.

O segundo e o terceiro caso apresentam valores muito semelhantes, como seria de esperar, pois a entrada do veículo na plataforma pela linha mais afastada está apenas 2 metros mais afastada do sonómetro, não provocando grande diferença no ruído sentido em comparação com a entrada pela linha mais próxima.

Os valores dos níveis sonoros estatísticos L_{A5} , L_{A50} e L_{A95} podem ser lidos no Quadro 6.2, assim como os tempos de medição decorridos. Para esta estação também é de notar a grande discrepância entre os valores estatísticos que incluem a passagem de comboios na plataforma de embarque.

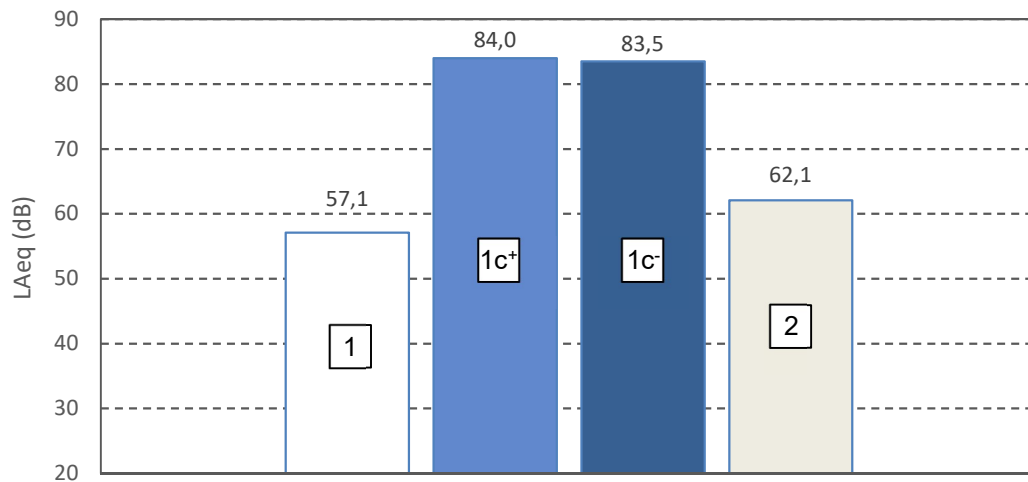


Fig. 6.2 - Valores do Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}) para os quatro casos de medição do ruído de fundo na estação Heroísmo (1s – pt.1 sem comboio; 1c⁺ - Ponto 1 com comboio na linha + próxima; 1c⁻ - Ponto 1 com comboio na linha - próxima; 2s – pt.2 sem comboio)

Quadro 6.2 - Níveis sonoros estatísticos (L_{AN}) para os três casos de medição do ruído de fundo na estação Heroísmo

Caso de medição	L_{A5} (dB)	L_{A50} (dB)	L_{A95} (dB)	Tempo de medição (min:seg)
1s - Ponto 1 sem comboio	58,6	56,8	55,6	08:04
1c ⁺ - Ponto 1 com comboio na linha + próxima	90,4	76,0	62,2	01:01
1c ⁻ - Ponto 1 com comboio na linha - próxima	90,2	80,6	71,2	01:19
2s - Ponto 2 sem comboio	63,2	61,8	60,8	03:13

6.1.1.3. Salgueiros

A terceira estação onde foram efetuadas medições foi a estação de Salgueiros, onde foram efetuadas medições para quatro casos com metodologia semelhante às outras estações: no ponto 1 sem nenhum comboio a passar pela plataforma de embarque; no ponto 1 com a passagem de um comboio; no ponto 1 com a passagem de dois comboios em simultâneo; e no ponto 2 (mais próximo do acesso às escadas) sem passagem de nenhum comboio. Os valores de nível sonoro equivalente para os quatro casos de medição estão descritos na Fig. 6.3, sendo estes de 52,7 dB(A) para o primeiro caso, 71,1 dB(A) para o segundo, e 75,1 e 56,0 dB(A) para o terceiro e quarto respetivamente. Como já apresentado para as estações anteriores, no

Quadro 6.3 estão representados os valores para os níveis sonoros estatísticos L_{A5} , L_{A50} e L_{A95} e os tempos de medição para cada caso.

Esta estação foi a única em que foram medidos valores de ruído de fundo durante a passagem simultânea de dois comboios na plataforma de embarque e é de notar, para todos os parâmetros de ruído de fundo apresentados, o aumento do nível sonoro do caso com um comboio para o caso com dois comboios.

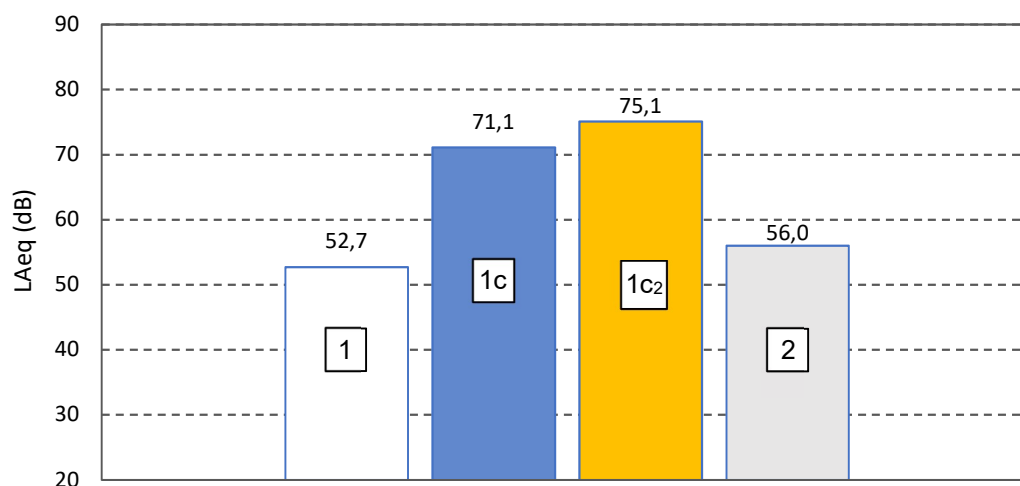


Fig. 6.3 - Valores do Nível Sonoro Equivalente (L_{Aeq}) para os quatro casos de medição do ruído de fundo na estação Salgueiros (1s – pt.1 sem comboio; 1c – pt.1 com comboio; 1c2 – pt.1 com dois comboios; 2s – pt.2 sem comboio)

Quadro 6.3 - Níveis sonoros estatísticos (L_{AN}) para os quatro casos de medição do ruído de fundo na estação Salgueiros

Caso de medição	L_{A5} (dB)	L_{A50} (dB)	L_{A95} (dB)	Tempo de medição (min:seg)
1s - Ponto 1 sem comboio	55,6	52,6	30,8	03:02
1c - Ponto 1 com comboio	76,0	69,6	58,4	01:15
1c2 - Ponto 1 com dois comboios	79,8	70,8	62,6	02:02
2s - Ponto 2 sem comboio	62,0	51,0	41,8	08:30

Relembrando o descrito no capítulo 5, o ponto 2 fica situado próximo da zona de acesso às escadas e é possível notar para todas as estações que os níveis sonoros são mais altos para as medições no ponto 2 do que no ponto 1 sem passagem de comboio. Isto porque as escadas rolantes, apesar de terem funcionamento intermitente, têm grande influência no ruído sentido na plataforma de embarque das estações.

6.1.1.4. Comparação e Análise de Resultados

O ruído de fundo nas estações em estudo tem duas fontes predominantes: a passagem dos comboios; e o funcionamento das escadas rolantes que dão acesso à plataforma de embarque. Este facto é comprovado pelas medições efetuadas. Para todas as medições que incluem um veículo a passar, os valores do nível sonoro contínuo equivalente são bastante superiores àqueles das medições sem passagem de veículos. Também para as medições efetuadas mais próximo das escadas rolantes, e apesar de estas terem um funcionamento intermitente, os valores do nível sonoro equivalente são superiores aos valores das medições no ponto 1 (junto à linha e sem comboio).

Fazendo a comparação dos níveis sonoros equivalentes entre as estações em estudo para cada ponto de medição (Fig. 6.4) conclui-se que:

Para o ponto 1 sem comboio, o valor mais baixo é o da estação Faria Guimarães com 47,6 dB(A), seguido da estação Salgueiros com 52,7 dB(A) e da estação Heroísmo com 57,1 dB(A);

Para o ponto 1 com comboio, o valor mais baixo é o de Salgueiros com 71,1 dB(A), valor acima é o de Faria Guimarães com 76,6 dB(A) e por fim o do Heroísmo com 84,0 dB(A). Nesta medição o valor mais baixo passou a ser o da estação Salgueiros;

No ponto 2 sem comboio, a valor mais baixo do nível sonoro contínuo equivalente foi o de Salgueiros com 56,0 dB(A), o segundo foi o de Faria Guimarães com 58,4 dB(A) e o mais elevado foi o da estação Heroísmo com 62,1 dB(A).

Nas Fig. 6.5, Fig. 6.6 e Fig. 6.7 é possível comparar os níveis sonoros estatísticos L_{A5} , L_{A50} e L_{A95} respetivamente das três estações para cada ponto de medição. De notar que a estação de Heroísmo é a que tem valores mais elevados, seguida da estação de Faria Guimarães e posteriormente pela de Salgueiros que é a que apresenta melhor comportamento.

No Quadro 6.4 é possível observar os ΔL máximos, obtidos para cada parâmetro (ΔL_{Aeq} , ΔL_{A5} , ΔL_{A50} e ΔL_{A95}) através da diferença entre o valor mais alto e o mais baixo em cada ponto. Este quadro comparativo permite a fácil perceção da diferença de ruído entre a estação mais ruidosa e a menos ruidosa para cada medição.

Para todos os pontos a estação mais ruidosa foi a do Heroísmo, sensação que foi notória nas visitas ao local. Os valores do L_{Aeq} são superiores em 12,9 dB ao ruído da estação de Salgueiros aquando da passagem do comboio e 6,1 dB junto à zona de acesso à plataforma de embarque. O ruído sentido nesta estação é devido principalmente ao funcionamento das escadas rolantes e ao escoamento de água em tubagens por baixo da linha. A existência de água em circulação tem origem no sistema de drenagem e bombagem necessário para retirar o excesso de água da envolvente da estação.

A estação de Salgueiros é a que tem menores valores do ruído de fundo. Em reunião com o Metro do Porto foi mencionado que todas as estações em estudo foram alvo de intervenções acústicas, no entanto as áreas tratadas foram diferentes para cada estação sendo de prever que tenha sido tratada na estação de Salgueiros uma área superior à tratada nas outras duas estações. Algo também referido na reunião com o Metro do Porto foram os serviços de manutenção de equipamento, notando-se diferentes estados de funcionamento dos mecanismos da escada rolante, pois também nesta estação o ruído das escadas rolantes era menor, este facto pode ser devido a uma intervenção recente aquando da visita à estação para as medições. Este diferente estado de funcionamento pode ter sido também a razão pela escada rolante da estação de Heroísmo se encontrar tão ruidosa no dia das medições.

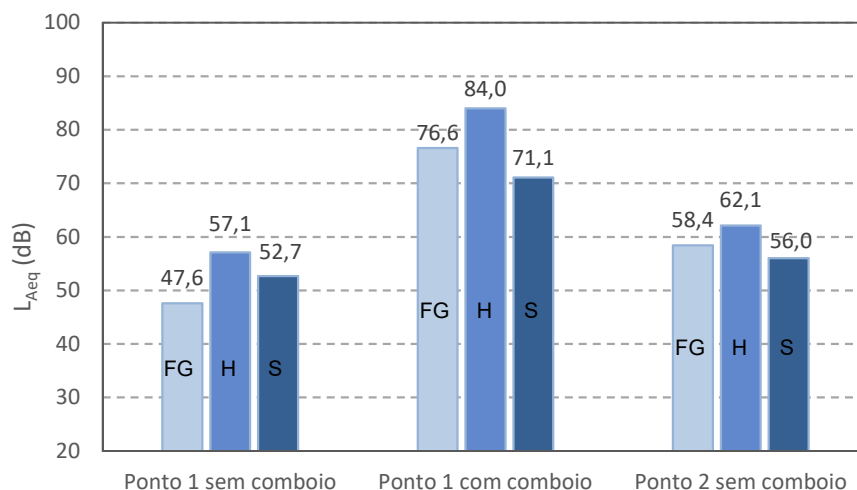


Fig. 6.4 - Valores do L_{Aeq} para cada estação agrupados por ponto de medição (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

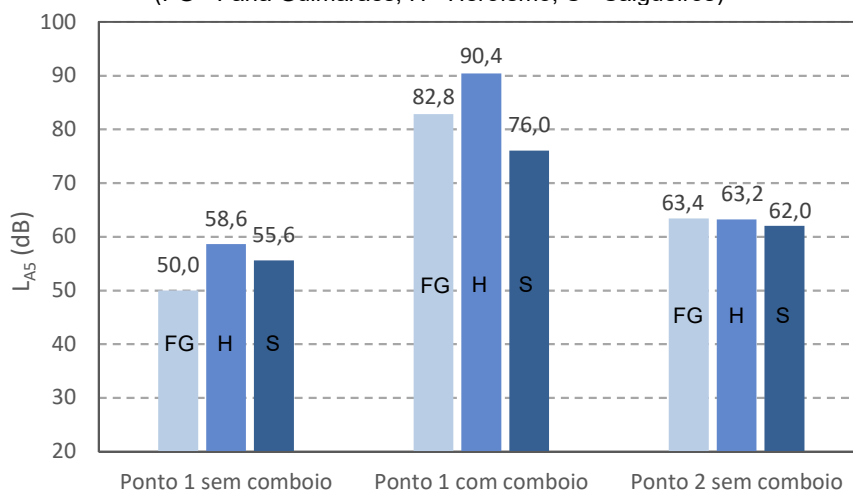


Fig. 6.5 - Valores do L_{A5} para cada estação agrupados por ponto de medição (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

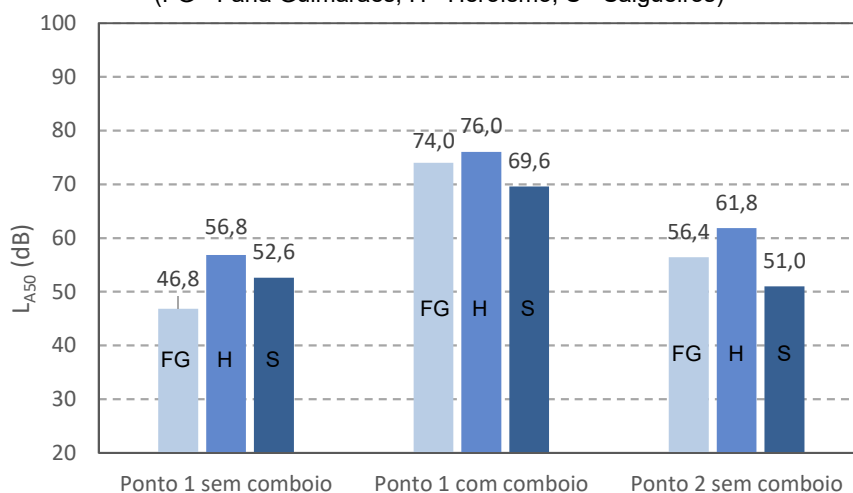


Fig. 6.6 - Valores do L_{A50} para cada estação agrupados por ponto de medição (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

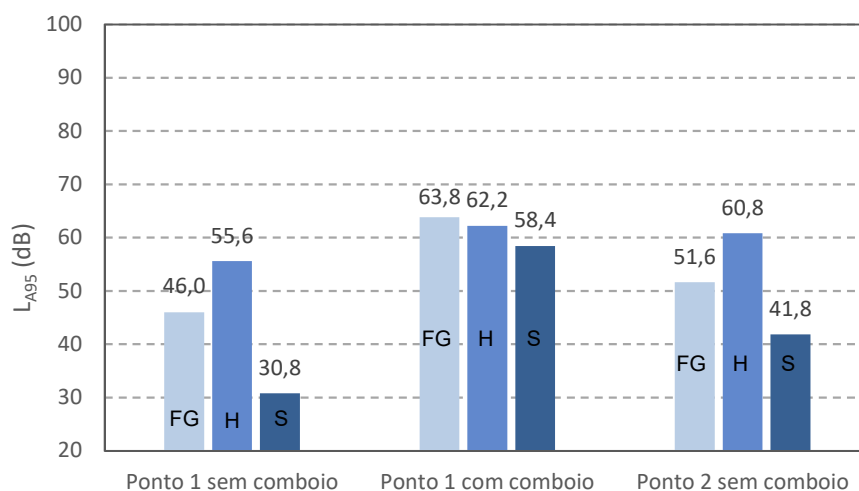


Fig. 6.7 - Valores do LA95 para cada estação agrupados por ponto de medição (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

Quadro 6.4 - Valores dos ΔL máximos entre estações calculados para os quatro parâmetros medidos (L_{Aeq} , L_{A5} , L_{A50} e L_{A95}) e para cada ponto de medição (1s – pt.1 sem comboio; 1c – pt.1 com comboio; 2s – pt.2 sem comboio)

Pontos	ΔL máximos (dB)			
	ΔL_{Aeq}	ΔL_{A5}	ΔL_{A50}	ΔL_{A95}
1s - Ponto 1 sem comboio	9,5	8,6	10,0	24,8
1c - Ponto 1 com comboio	12,9	14,4	6,4	5,4
2s - Ponto 2 sem comboio	6,1	1,4	10,8	19,0

6.1.2. RASTI

6.1.2.1. Faria Guimarães

O parâmetro para avaliar a inteligibilidade da palavra utilizado neste trabalho é o RASTI, este pode ter valores entre 0 e 1. O Quadro 6.5 divide os valores possíveis em cinco intervalos e qualifica cada um deles quanto à inteligibilidade da palavra (*Má*, *Pobre*, *Aceitável*, *Boa* e *Excelente*). [54]

Quadro 6.5 - Descrição qualitativa da inteligibilidade da palavra de acordo com os valores de RASTI [54]

RASTI	Inteligibilidade
[0,00 – 0,30[<i>Má</i>
[0,30 – 0,45[<i>Pobre</i>
[0,45 – 0,60[<i>Aceitável</i>
[0,60 – 0,75[<i>Boa</i>
[0,75 – 1,00]	<i>Excelente</i>

Para a estação de Faria Guimarães os valores de RASTI estão apresentados na Fig. 6.8, a medição destes foi efetuada em oito locais diferentes, sendo que para cada par de pontos 1, 2, 3 e 4 foram feitas duas medições, uma junto à linha e outra junto à parede da plataforma. Os valores medidos estão distribuídos pelas categorias *Má*, *Pobre* e *Aceitável*.

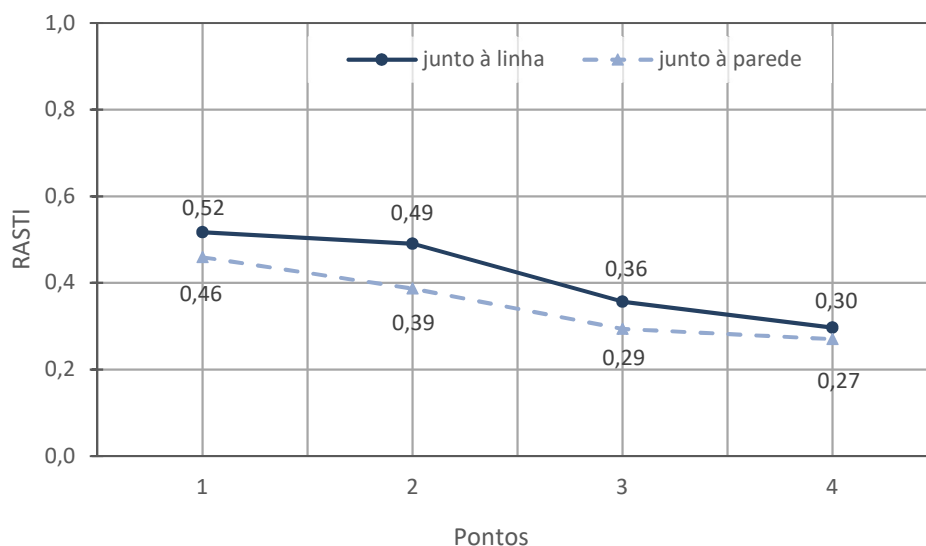


Fig. 6.8 - Valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Faria Guimarães

No Quadro 6.6 estão representados os valores do RASTI medidos, assim como as médias por zona, por par de pontos e geral da estação. Os valores médios do RASTI permitem ter uma ideia da variação da inteligibilidade da palavra na plataforma.

Com as médias por pares de pontos, uma vez que a única diferença de localização é a distância à fonte, podemos perceber como evolui a inteligibilidade da palavra com a distância do recetor à fonte. Os pares estão espaçados cerca de dez metros entre si, deste modo podemos notar que existe uma diferença nos valores do RASTI de 0,49 a dez metros da fonte para 0,28 a quarenta metros da fonte. No espaço de sensivelmente trinta metros ouve um decréscimo de 0,21 no RASTI.

Analisando as médias nas duas zonas (junto à linha e junto à parede) percebe-se uma diminuição da inteligibilidade na zona junto à parede, isto poderá advir das muitas reflexões que o som sofre e do campo difuso criado que tornam mais inteligível a palavra no centro junto à linha do que encostado à parede.

A média de todos os pontos da estação por ser a fusão de valores muito dispersos torna-se pouco representativa em termos absolutos, porém, uma vez que é obtida da mesma forma para todas as estações de metro servirá de ponto de comparação entre as estações em estudo nesta dissertação.

Quadro 6.6 – Tabela resumo dos valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Faria Guimarães com as respetivas médias por par de pontos, por zona e média geral da estação

Pontos	Junto à linha	Junto à parede	Média por par de pontos
1	0,52	0,46	0,49
2	0,49	0,39	0,44
3	0,36	0,29	0,33
4	0,30	0,27	0,28
Média por zona	0,42	0,35	Média da estação: 0,38

6.1.2.2. Heroísmo

Na estação do Heroísmo, a metodologia foi semelhante, com a medição de quatro pares de pontos localizados em zonas semelhantes. A Fig. 6.9 exhibe os valores do RASTI medidos nessa estação, para os quatro pares de pontos separados pela zona junto à linha e junto à parede. Para esta estação os valores obtidos foram bastante baixos, sendo que 50% dos valores estão na categoria de “Má” inteligibilidade e apenas um dos valores se encontra na categoria de “Aceitável”.

Assim como para a primeira estação, no Quadro 6.7 estão representadas para a estação Heroísmo os valores medidos do RASTI e as respetivas médias por zona, par de pontos e geral da estação. É possível observar a diminuição da inteligibilidade do par mais próximo para o mais afastado, o valor do RASTI diminui 0,45 para 0,21. Nesta estação também se verifica que os pontos mais juntos da linha têm melhor inteligibilidade do que aqueles junto à parede.

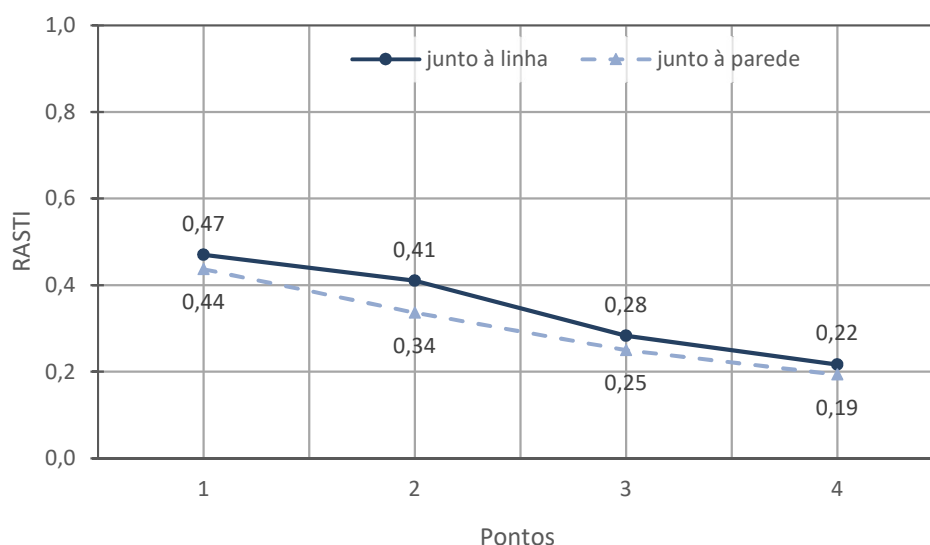


Fig. 6.9 - Valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Heroísmo

Quadro 6.7 - Tabela Resumo dos valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Heroísmo com as respetivas médias por par de pontos, por zona e média geral da estação

Pontos	Junto à linha	Junto à parede	Média por par de pontos
1	0,47	0,44	0,45
2	0,41	0,34	0,37
3	0,28	0,25	0,27
4	0,22	0,19	0,21
Média por zona	0,35	0,30	Média da estação: 0,32

6.1.2.3. Salgueiros

Os valores do RASTI para a estação Salgueiros estão representados na Fig. 6.10, tendo sido utilizada uma metodologia semelhante à utilizada nas estações previamente referidas. Os valores para esta estação estão compreendidos entre uma inteligibilidade “Aceitável” e “Boa”.

Os valores do RASTI medidos na plataforma de embarque da estação de Salgueiros, e as médias por par de pontos, por zona e média geral da estação podem ser vistas no Quadro 6.8. A evolução dos valores do RASTI em função da distância entre a fonte e o recetor é mais favorável, para esta estação a diferença entre o primeiro par de pontos e o último é de apenas 0,15. À semelhança das estações já analisadas, a inteligibilidade junto à linha é mais alta que junto à parede da plataforma.

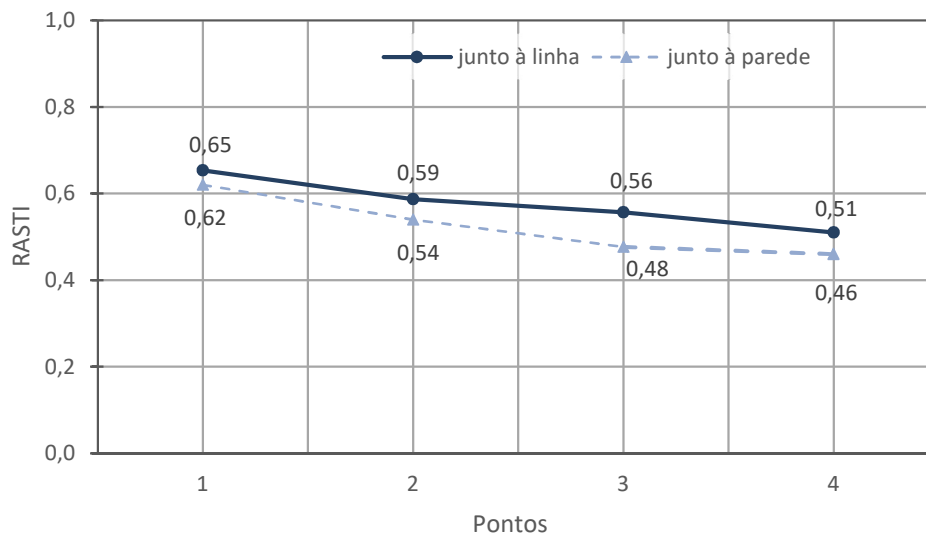


Fig. 6.10 - Valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Salgueiros

Quadro 6.8 - Tabela Resumo dos valores do RASTI para as oito medições efetuadas na estação Salgueiros com as respetivas médias por par de pontos, por zona e média geral da estação

Pontos	Junto à linha	Junto à parede	Média por par de pontos
1	0,65	0,62	0,64
2	0,59	0,54	0,56
3	0,56	0,48	0,52
4	0,51	0,46	0,49
Média por zona	0,58	0,52	Média da estação: 0,55

6.1.2.4. Comparação e Análise de Resultados

A evolução da inteligibilidade da palavra, analisada nas estações com recurso ao parâmetro RASTI, está representada na Fig. 6.11. Nesta figura estão apresentadas para as três estações, as médias dos valores medidos para cada par de pontos.

A estação com os valores mais baixos do RASTI é a do Heroísmo, com valores de 0,45, 0,37, 0,27 e 0,21 para os pontos 1, 2, 3 e 4 respetivamente. Os dois valores mais baixos são qualificados como *Maus* e os dois seguintes como *Pobres*. Esta estação é também a que possui maior ruído de fundo, facto que contribui para a má inteligibilidade.

A estação Faria Guimarães é a seguinte na ordem crescente de inteligibilidade, com valores do RASTI de 0,49, 0,44, 0,33 e 0,28. No entanto, apesar de ter valores superiores à estação do Heroísmo, os valores medidos nesta estação são também muito baixos, sendo que apenas no ponto 1 a inteligibilidade está na categoria do “Aceitável”, para os pontos 2 e 3 a inteligibilidade é “Pobre” e para o ponto 4 é “Má”.

Os melhores valores para o RASTI foram medidos na estação de Salgueiros, com 0,64, 0,56, 0,52 e 0,49 para os quatro pontos. Nesta estação três dos valores são considerados “Aceitáveis” e o mais valor mais alto “Bom”.

É de notar que a estação de Salgueiros é a que apresenta menor decréscimo do ponto 1 para o ponto 4, este facto poderá ter origem na diferente disposição das entradas à plataforma de embarque. Nesta estação, existem duas entradas nas extremidades da plataforma, enquanto que para as outras duas estações existe apenas uma entrada, mas situada a meio da plataforma. Uma vez que as medições do RASTI foram efetuadas numa zona mais central da plataforma, a zona de acesso às escadas poderá ter tido mais influência no decréscimo dos valores do RASTI com a distância à fonte para as estações de Faria Guimarães e Heroísmo do que para a estação de Salgueiros. O facto da estação de Salgueiros ter um ruído de fundo menos intenso que as outras, também contribui para esta ter uma inteligibilidade melhor.

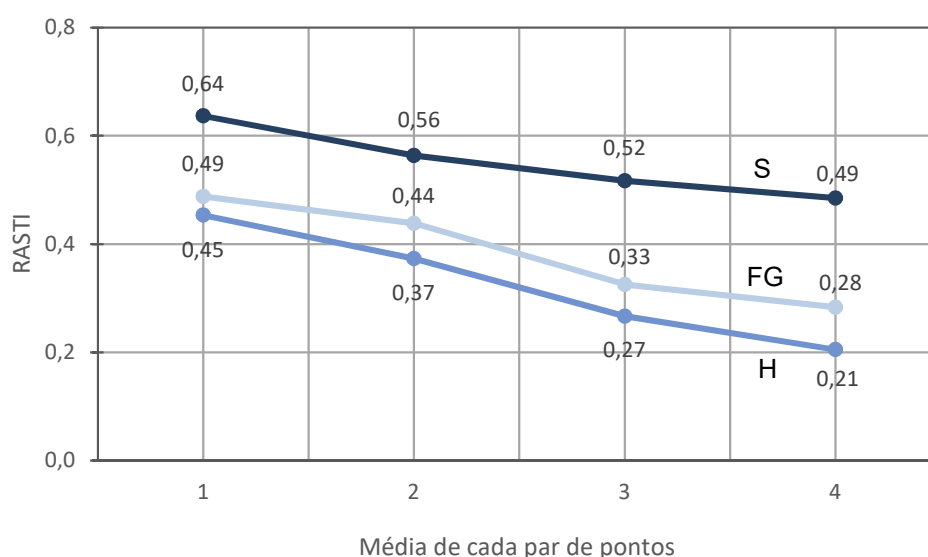


Fig. 6.11 - Média dos valores de RASTI de cada par de pontos (junto à linha e junto à parede) para as três estações em estudo (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

Utilizando os valores de todas as medições foi calculada uma média geral do RASTI para cada estação. A comparação do valor geral de cada estação pode ser observada na

Fig. 6.12. Apesar deste valor ser uma combinação de medições em posições muito distintas, ao ter sido obtido da mesma forma para as três estações funciona como bom indicador para comparar o comportamento a nível da inteligibilidade das três estações. Deste modo temos com o valor mais baixo, a estação do Heroísmo (0,32), seguida pela de Faria Guimarães (0,38) e por fim a estação de Salgueiros (0,55) com uma média geral consideravelmente superior às outras.

Nas Fig. 6.13 e Fig. 6.14 estão comparados respetivamente as médias dos valores de RASTI junto à linha e junto à parede para as três estações. Os melhores valores de RASTI são para a estação de Salgueiros e os piores para a de Heroísmo, coincidentes com os valores da média geral da estação. Nota-se valores de RASTI ligeiramente superiores para os pontos junto à linha, sendo deste modo de esperar uma inteligibilidade mais baixa junto à parede.

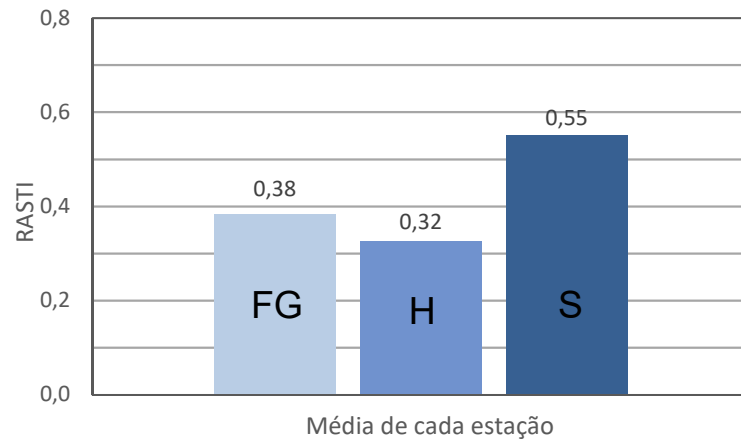


Fig. 6.12 - Média geral para cada estação (8 posições) das medições do RASTI (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

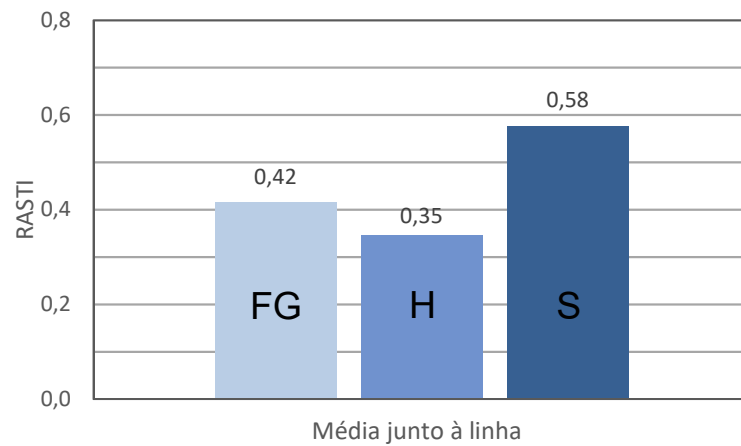


Fig. 6.13 - Média junto à linha para cada estação (4 posições) das medições do RASTI (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

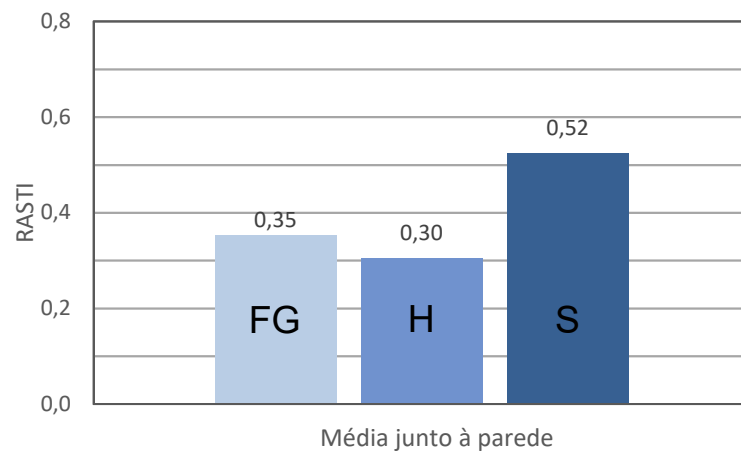


Fig. 6.14 - Média junto à parede para cada estação (4 posições) das medições do RASTI (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

6.1.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

6.1.3.1. Faria Guimarães

O tempo de reverberação, de acordo com o descrito no capítulo 5, foi medido em quatro pontos com o microfone orientado em duas orientações diferentes para cada ponto, originando oito medições. Os valores obtidos para as oito medições na estação Faria Guimarães por bandas de 1/3 de oitava estão apresentados na Fig. 6.15. Os mesmos valores podem ser verificados no Quadro 6.9, assim como a média e o desvio padrão para cada frequência. Os valores do desvio padrão salientam a variabilidade das medições, que devido ao ruído de fundo apresentam para certos pontos e frequências valores distintos dos esperados. Para grande parte das frequências o tempo de reverberação ronda os cinco segundos.

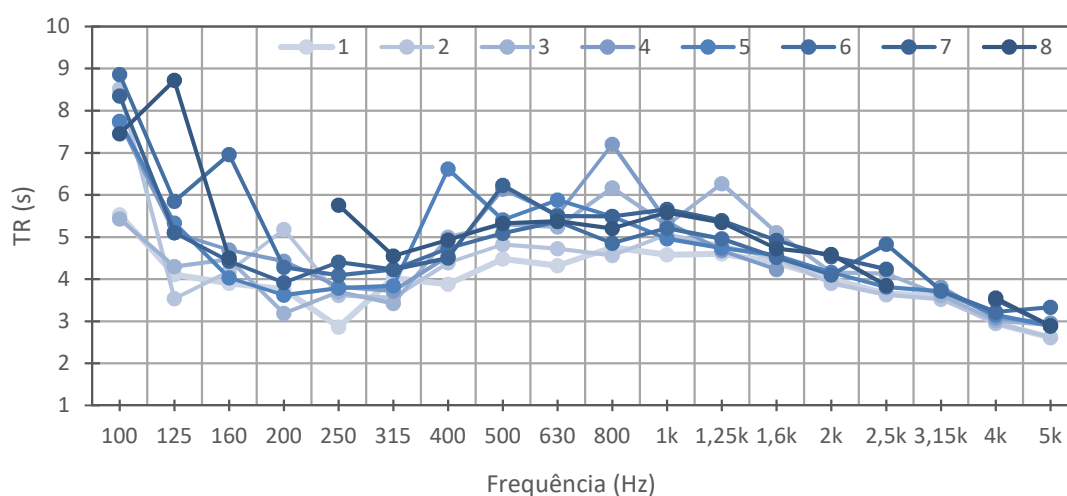


Fig. 6.15 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de 1/3 de oitava, para as oito medições na estação Faria Guimarães

Quadro 6.9 - Valores de Tempo de Reverberação por bandas de 1/3 de oitava, média e desvio padrão, para as oito medições efetuadas na estação Faria Guimarães

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)								Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8		
100	5,53	8,52	5,43	7,73	7,75	8,86	8,35	7,45	7,45	1,30
125	4,11	3,54	4,30	5,10	5,33	5,85	5,10	8,72	5,26	1,58
160	3,90	4,18	4,47	4,69	4,03	6,96	4,43	4,50	4,65	0,97
200	3,76	5,18	3,19	4,43	3,62	4,28	3,92		4,05	0,65
250	2,86	3,61	3,70	3,82	3,79	4,09	4,40	5,76	4,00	0,84
315	4,02	3,56	3,42	3,72	3,84	4,23	4,23	4,55	3,95	0,38
400	3,88	4,39	5,00	4,55	6,62	4,73	4,50	4,93	4,83	0,81

500	4,48	4,82	5,30	6,14	5,41	5,09	6,23	5,32	5,35	0,60
630	4,32	4,72	5,24	5,53	5,88	5,37	5,50	5,38	5,24	0,49
800	4,75	4,56	6,17	7,20	5,48	4,85	5,49	5,20	5,46	0,87
1k	4,58	5,06	5,28	5,36	4,96	5,21	5,66	5,58	5,21	0,35
1,25k	4,60	4,79	6,27	4,68	4,74	4,96	5,39	5,35	5,10	0,56
1,6k	4,39	4,49	5,10	4,23	4,57	4,52	4,92	4,72	4,62	0,28
2k	3,99	3,90	4,16		4,16	4,10	4,53	4,59	4,20	0,26
2,5k	3,65	3,63	4,13		3,81	4,83	4,24	3,85	4,02	0,42
3,15k	3,61	3,52	3,61	3,81	3,71	3,73			3,67	0,10
4k	2,95	2,95	3,01	3,08	3,15	3,22	3,51	3,55	3,18	0,24
5k	2,61	2,62	2,91	2,96	2,89	3,33	2,89	2,89	2,89	0,22

6.1.3.2. Heroísmo

Para a estação do Heroísmo, os valores das oito medições estão apresentados na Fig. 6.16. É possível notar nas frequências mais baixas uma elevada disparidade de valores, possivelmente por serem frequências mais próximas das frequências dominantes do ruído de fundo, devido a este facto são geradas perturbações na medição do decaimento do som emitido no processo de análise do tempo de reverberação. No Quadro 6.10 estão descritos os valores medidos juntamente com a média e o desvio padrão por banda de frequência. O valor médio para o tempo de reverberação da estação é, à semelhança da estação Faria Guimarães, cinco segundos.

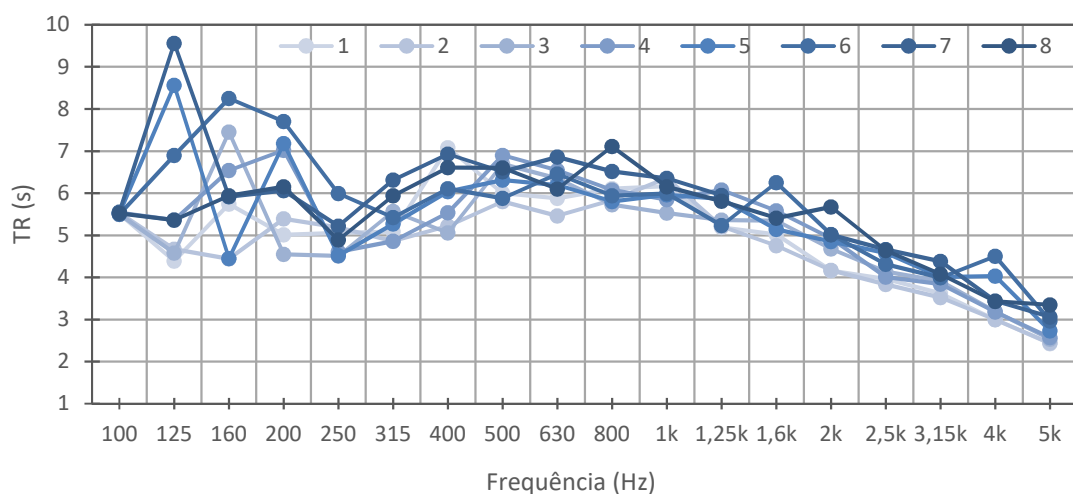


Fig. 6.16 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de 1/3 de oitava, para as oito medições na estação Heroísmo

Quadro 6.10 - Valores de Tempo de Reverberação por bandas de 1/3 de oitava, média e desvio padrão, para as oito medições efetuadas na estação Heroísmo

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)									Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	
100	5,51	5,53	5,50	5,54	5,52	5,50	5,55	5,52	5,52	0,02
125	4,39	4,67	4,58	5,36	8,56	6,90	9,56	5,36	6,17	1,96
160	5,74	4,44	7,45	6,54	4,45	8,25	5,92	5,94	6,09	1,33
200	5,01	5,39	4,55	7,02	7,18	7,70	6,06	6,15	6,13	1,11
250	5,06	5,19	4,51	4,61	4,52	5,99	5,22	4,89	5,00	0,49
315	5,09	4,86	5,57	4,86	5,27	5,42	6,31	5,94	5,42	0,51
400	7,08	5,22	5,06	5,54	6,04	6,11	6,93	6,61	6,07	0,76
500	6,00	5,80	6,69	6,90	6,31	5,88	6,51	6,60	6,34	0,41
630	5,88	5,46	6,35	6,54	6,19	6,46	6,86	6,10	6,23	0,43
800	6,11	5,83	5,73	6,08	5,80	5,94	6,52	7,11	6,14	0,46
1k	6,17	6,36	5,53	5,85	5,96	5,99	6,35	6,15	6,05	0,28
1,25k	5,19	5,21	5,36	6,08	5,86	5,23	5,95	5,81	5,59	0,37
1,6k	5,02	4,75	5,35	5,58	5,14	6,25		5,41	5,36	0,48
2k	4,16	4,17	4,68	4,93	4,85	5,02	5,01	5,67	4,81	0,49
2,5k	3,96	3,83	4,14	4,01	4,58	4,31	4,66	4,64	4,27	0,33
3,15k	3,62	3,52	3,91	3,84	4,01	3,99	4,38	4,08	3,92	0,27
4k	3,00	3,00	3,19	3,18	4,03	4,50	3,44	3,43	3,47	0,53
5k	2,43	2,44	2,53	2,57	2,73	2,97	3,06	3,35	2,76	0,33

6.1.3.3. Salgueiros

Os valores do tempo de reverberação para a estação de Salgueiros, estão representados na Fig. 6.17. Nesta figura é possível observar a evolução dos valores dos tempos de reverberação em função da frequência, notando-se uma alta disparidade de valores para as frequências mais baixas, tal como ocorreu para as estações anteriores. No Quadro 6.11 estão descritos os valores dos TR por banda de 1/3 de oitava, a média e o desvio padrão. O tempo de reverberação médio da estação de Salgueiros é aproximadamente três segundos.

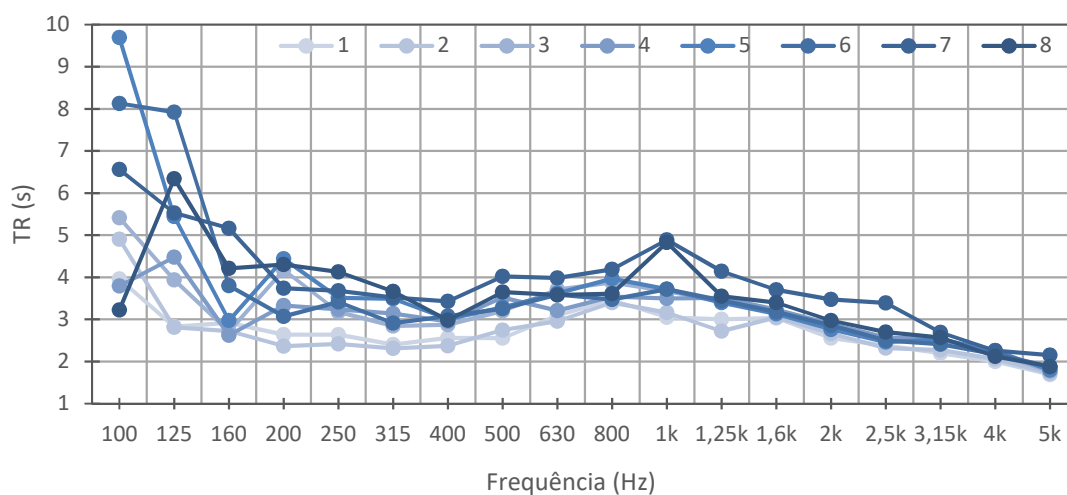


Fig. 6.17 – Valores do Tempo de Reverberação por banda de 1/3 de oitava, para as oito medições na estação Salgueiros

Quadro 6.11 - Valores de Tempo de Reverberação por bandas de 1/3 de oitava, média e desvio padrão, para as oito medições efetuadas na estação Salgueiros

Frequência (Hz)	Tempo de Reverberação (s)								Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6	7	8		
100	3,96	4,90	5,41	3,79	9,69	8,13	6,56	3,22	5,71	2,27
125	2,83	2,81	3,94	4,48	5,44	7,92	5,53	6,34	4,91	1,76
160	2,92	2,72	2,71	2,62	2,97	3,80	5,16	4,21	3,39	0,92
200	2,64	2,36	4,17	3,33	4,44	3,07	3,74	4,30	3,51	0,78
250	2,64	2,42	3,18	3,24	3,51	3,41	3,68	4,13	3,28	0,55
315	2,40	2,31	2,84	3,14	3,49	2,91	3,52	3,66	3,03	0,51
400	2,56	2,37	2,87	2,95	3,01	3,08	3,43	2,98	2,91	0,32
500	2,55	2,74	3,20	3,52	3,28	3,25	4,02	3,65	3,28	0,47
630	3,09	2,96	3,71	3,21	3,62	3,59	3,98	3,58	3,47	0,35
800	3,46	3,40	3,88	3,54	3,97	3,47	4,19	3,61	3,69	0,29
1k	3,05	3,16	3,67	3,50	3,72	3,72	4,89	4,83	3,82	0,69
1,25k	3,00	2,72	3,43	3,51	3,40	3,45	4,14	3,55	3,40	0,42
1,6k	3,03	3,05	3,19	3,23	3,13	3,18	3,70	3,40	3,24	0,22

2k	2,55	2,66	2,85	2,89	2,76	2,86	3,47	2,97	2,88	0,27
2,5k	2,38	2,32	2,47	2,57	2,46	2,50	3,39	2,70	2,60	0,34
3,15k	2,20	2,27	2,54	2,53	2,52	2,41	2,69	2,57	2,47	0,16
4k	2,00	2,06	2,18	2,18	2,26	2,17	2,26	2,12	2,15	0,09
5k	1,69	1,72	1,77	1,85	1,79	1,88	2,15	1,88	1,84	0,14

6.1.3.4. Comparação e Análise de Resultados

A evolução dos valores do tempo de reverberação em função da frequência pode ser observada na Fig. 6.18. É possível notar um desenvolvimento semelhante para as três estações. Para as bandas de 100 e 125 Hz o valor do TR é alto, tem de seguida um decréscimo até perto dos 400 Hz. Para as frequências médias o valor do TR sobe ligeiramente e começa novamente a decrescer com a entrada nas altas frequências.

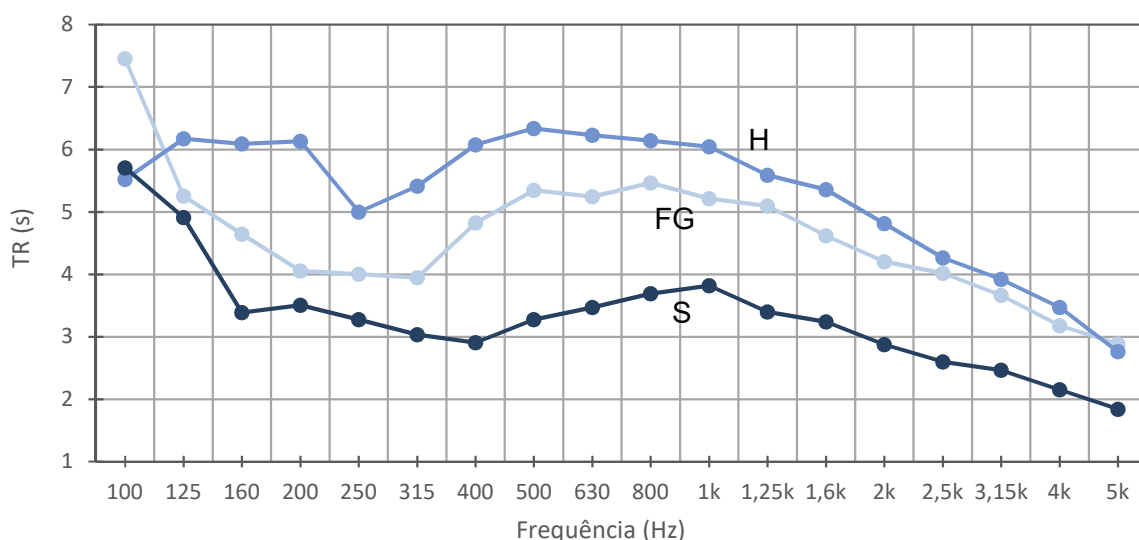


Fig. 6.18 – Média dos valores do Tempo de Reverberação das oito medições de cada estação por banda de 1/3 de oitava (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

Na Fig. 6.19 estão representados os tempos de reverberação médios (400-2500 Hz) de cada estação, sendo que a que tem um menor TR é a de Salgueiros, com 3,6 segundos. A seguinte numa ordem crescente de TR é a estação de Faria Guimarães com 4,9 segundos e a que tem TR mais alto é a do Heroísmo com 5,7 segundos. À semelhança dos resultados do RASTI, a estação com o valor mais favorável é a de Salgueiros, com uma diferença de 1,6 segundos da estação de Faria Guimarães e de 2,4 segundos para a de Heroísmo.

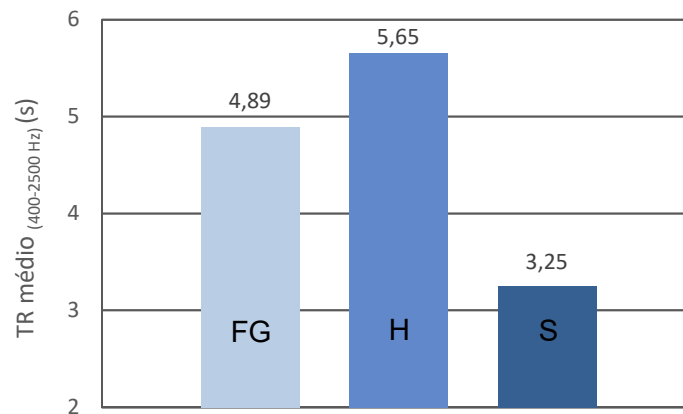


Fig. 6.19 - Tempo de Reverberação Médio (400-2500 Hz) de cada estação
(FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

O tempo de reverberação é um parâmetro bastante importante no comportamento acústico dos espaços. A sua influência é sentida principalmente na inteligibilidade da palavra que é a principal preocupação em locais como estações de metro. Com recurso aos resultados apresentados neste capítulo, salienta-se a relação entre o TR e o RASTI, mais precisamente o facto de as estações com menor tempo de reverberação serem também as que possuem um RASTI mais elevado. No

Quadro 6.12 estão representados os valores do L_{Aeq} para o ponto 1 com a passagem de comboio, as médias gerais do RASTI e os valores do TR (400-2500 Hz) para as três estações. De notar a coerência entre os três parâmetros, sendo a estação menos ruidosa aquela com menor TR e melhor inteligibilidade, e a estação mais ruidosa aquela com maior TR e pior inteligibilidade. Os valores do RASTI estão em ordem crescente e os de TR e L_{Aeq} em ordem decrescente, pois quanto maior o TR e o Ruído de Fundo, pior são os valores do RASTI.

Quadro 6.12 - Tabela resumo dos valores médios do RASTI e do Tempo de Reverberação para as três estações em estudo

Parâmetro	Heroísmo	Faria Guimarães	Salgueiros
L_{Aeq} (dB)	84,0	76,6	71,1
RASTI (médio)	0,32	0,38	0,55
TR (400-2500 Hz)	5,65	4,89	3,25

O Quadro 6.13 classifica as três estações em estudo de acordo com a avaliação geral de cada parâmetro, deste modo, a estação do Heroísmo é a pior para todos os parâmetros, a de Faria Guimarães tem um comportamento intermédio e a de Salgueiros é a estação com melhor comportamento.

Quadro 6.13 – Classificação comparativa das diferentes estações em função do parâmetro analisado

Parâmetro	Faria Guimarães	Heroísmo	Salgueiros
Ruído de Fundo	-	pior	melhor
RASTI	-	pior	melhor
TR	-	pior	melhor

6.2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De modo a tentar perceber a razão para o tempo de reverberação ser tão diferente para estas estações com características idênticas foram feitas duas análises aos parâmetros geométricos/arquitetónicos.

A primeira análise consistiu na medição dos volumes destas estações com recurso a plantas, medições *in situ* e ao *software* AutoCAD® com a sua funcionalidade 3D. As três estações foram modeladas de forma simplificada apenas com o propósito de extrair o valor corresponde ao volume da estação. Os modelos 3D criados para as estações Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros podem ser observados nas Fig. 6.20, Fig. 6.21 e Fig. 6.22 respetivamente.

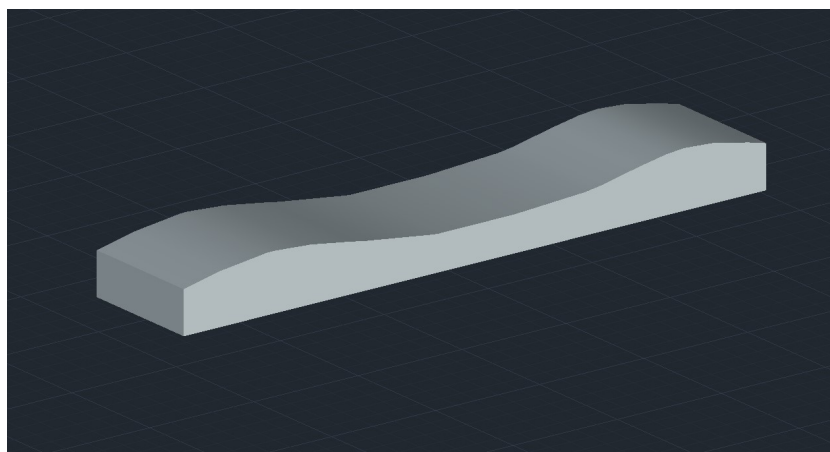


Fig. 6.20 - Modelo 3D para cálculo do volume da estação Faria Guimarães

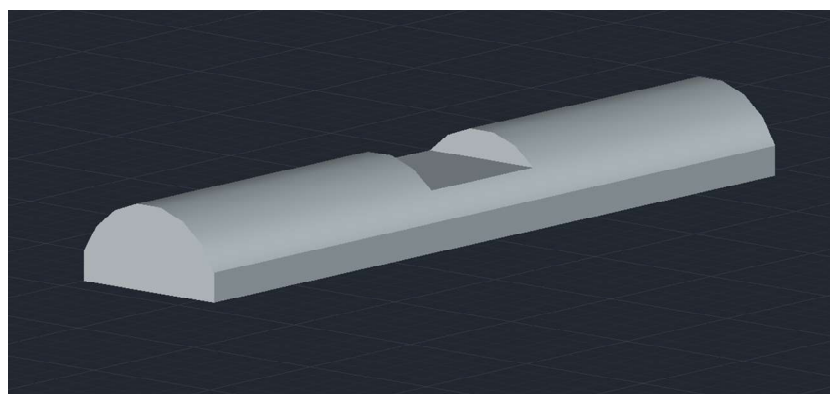


Fig. 6.21 - Modelo 3D para cálculo do volume da estação Heroísmo

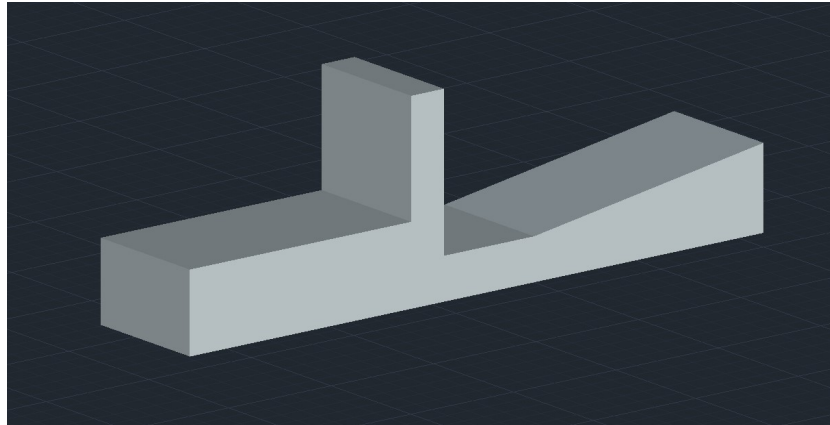


Fig. 6.22 - Modelo 3D para cálculo do volume da estação Salgueiros

Os valores de volume obtidos para as três estações podem ser observados no Quadro 6.14. Seria de esperar que a estação com menor tempo de reverberação tivesse um volume menor, no entanto a estação de Salgueiros, que é a que possui o TR mais baixo, tem um volume bastante superior às outras estações com quase 8000 m³.

Quadro 6.14 - Volumes de ar para as três estações em estudo

Estação	Volume aprox. (m ³)
Faria Guimarães	5054
Heroísmo	5594
Salgueiros	7855

A segunda análise foi feita tendo em conta as diferentes áreas tratadas nas estações. Em reunião com os responsáveis do Metro do Porto foram referidas as intervenções acústicas nas estações em estudo, sendo que a única intervenção até à data foi contemporânea à construção das mesmas. O material aplicado nas estações foi o sistema *BASWAphon* [55] que consiste em painéis de lã mineral calibrados e de peso reduzido colados sobre uma base (neste caso teto falso) e posteriormente barrados em vários passos com massa mineral de forma a obter uma superfície contínua. A espessura total do sistema do sistema aplicado foi de 30 mm.

As áreas aplicadas na zona da plataforma de embarque de acordo com informação da Metro do Porto [56] estão expressas no Quadro 6.15, a estação de Salgueiros é que tem maior área de tratamento acústico, com 790 m², as estações de Faria Guimarães e Heroísmo têm 600 e 550 m² respetivamente.

Quadro 6.15 – Área de teto acústico aplicado nas três estações em estudo [adaptado de 56]

Estação	Área de teto acústico aprox. (m ²)
Faria Guimarães	600
Heroísmo	550
Salgueiros	790

O Quadro 6.16 apresenta as áreas de teto acústico, as áreas de teto não tratado e o rácio entre estas duas áreas, de forma a relacionar com o TR médio medido para as três estações.

Quadro 6.16 – Áreas de teto não tratado, áreas de teto acústico, rácio entre as áreas para análise da relação com o TR médio (400-2500 Hz)

Estação	Área de teto não tratado (m ²)	Área de teto acústico (m ²)	Rácio entre teto acústico/não tratado	TR médio (400-2500 Hz) (s)
Faria Guimarães	640	600	0,94	4,9
Heroísmo	625	550	0,88	5,7
Salgueiros	500	790	1,58	3,3

Para completar a análise foram elaboradas duas correlações: uma entre os valores da área de teto acústico e o tempo de reverberação (Fig. 6.23); e outra entre os valores do rácio (teto acústico/teto não tratado) e o tempo de reverberação (Fig. 6.24). Ambas análises apontam para uma forte relação entre a quantidade de área tratada acusticamente e o tempo de reverberação. A estação com maior quantidade de teto acústico aplicado é aquela com menor tempo de reverberação, pois o material acústico aplicado irá absorver e atenuar as ondas sonoras que se propagam na estação. Por oposição a estação com menor área de teto acústico aplicado é aquela que tem maior tempo de reverberação.

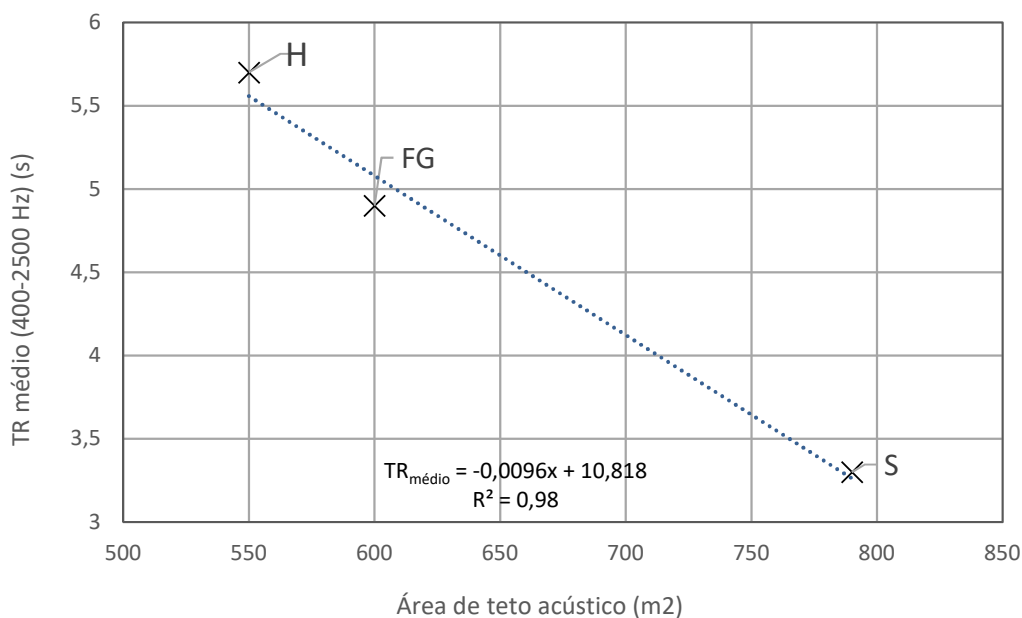


Fig. 6.23 - Relação entre o TR médio (400-2500 Hz) e as áreas de teto acústico para as três estações (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

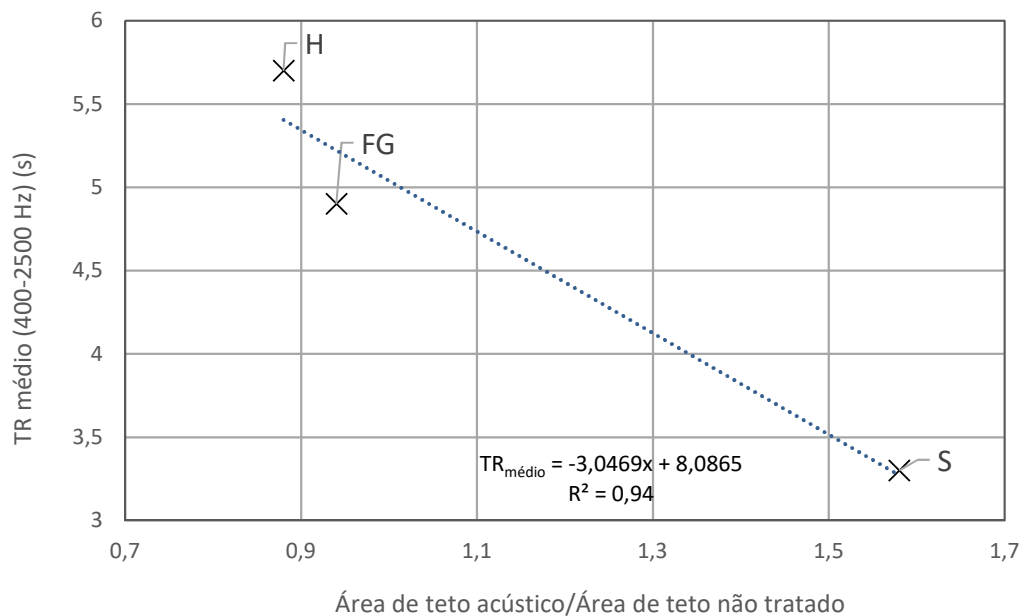


Fig. 6.24 - Relação entre o TR médio (400-2500 Hz) e o rácio das áreas de teto acústico sobre as áreas de teto não tratado, para as três estações (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

Através desta análise é possível concluir que as condições acústicas sentidas nas três estações estão ligadas às quantidades de material acústico aplicado, tendo um forte impacto nos valores do TR, que por sua vez dificulta muito a inteligibilidade e conduz a valores de RASTI baixos. Também os valores do ruído de fundo são afetados, pois todo o ruído de fundo que se propaga nas estações irá ser mais ou menos atenuado conforme o melhor ou pior tratamento acústico aplicado no local.

6.3. CUMPRIMENTO DA REGULAMENTAÇÃO - R.R.A.E.

Como já mencionado no capítulo 5, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios exige no seu artigo 10º para as estações de transporte de passageiros:

No interior dos átrios ou salas de embarque das estações de transporte de passageiros, de volume superior a 350 m³, considerados mobilados normalmente e sem ocupação, o tempo de reverberação, T, correspondente à média aritmética dos valores obtidos para as bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, deverá satisfazer as condições seguintes, nas quais V se refere ao volume interior do recinto em causa:

$$T_{500\text{Hz}-2000\text{Hz}} \leq 0,12V^{1/3},$$

se os espaços forem dotados de sistema público de mensagens sonoras.

O edifício, ou qualquer das suas partes, é considerado conforme aos requisitos acústicos aplicáveis quando o valor obtido para o tempo de reverberação, T, diminuído do factor I no valor de 25 % do limite regulamentar, satisfaça o limite regulamentar. [48]

O cálculo do tempo de reverberação regulamentar foi calculado com a equação $T_{500-2k\text{ Hz}} \leq 0,12V^{1/3}$ visto que as estações de metro possuem sistema público de mensagens sonoras. Os valores do volume utilizados foram os obtidos no subcapítulo 6.2.3 com recurso a modelação 3D. Os valores do TR foram corrigidos com o fator de incerteza I no valor de 25% do limite máximo regulamentar. Nos seguintes quadros podem ser observados os valores calculados para verificar o cumprimento do tempo de reverberação regulamentar. O Quadro 6.17 apresenta os valores de volume, do TR regulamentar calculado pela equação $T_{500\text{ Hz}-2000\text{ Hz}} \leq 0,12V^{1/3}$ e do Fator I. O Quadro 6.18 apresenta o TR regulamentar, os valores do tempo de reverberação medido *in situ* e os valores do TR corrigidos do fator I (25% do TR regulamentar). O Quadro 6.18 permite também a comparação entre os valores de TR regulamentares e os valores de TR medidos já corrigidos do fator I e a diferença entre o TR corrigido e o TR regulamentar.

Quadro 6.17 - Valores do volume interior, do tempo de reverberação regulamentar máximo obtido pela equação $T_{500\text{ Hz}-2000\text{ Hz}} \leq 0,12V^{1/3}$ e do fator I (25% do TR regulamentar) para as três estações em estudo

Estação	Volume aprox. (m ³)	TR máximo regulamentar (s)	Fator I (25% TR regulamentar)
Faria Guimarães	5054	2,06	0,51
Heroísmo	5594	2,13	0,53
Salgueiros	7855	2,39	0,60

Quadro 6.18 – Comparação, para as três estações, dos valores do tempo de reverberação regulamentar com o tempo de reverberação medido *in situ* e corrigido do fator I (25% TR máx. regulamentar)

Estação	TR máximo regulamentar (s)	TR médio medido <i>in situ</i> (s)	TR medido <i>in situ</i> corrigido com I (s)	Verificação	Δ (s)
Faria Guimarães	2,06	4,89	4,38	K.O.	2,3
Heroísmo	2,13	5,65	5,12	K.O.	3,0
Salgueiros	2,39	3,25	2,66	K.O.	0,3

Com a análise do Quadro 6.18 é possível notar que nenhuma das estações cumpre o limite regulamentar do tempo de reverberação estipulado pelo R.R.A.E. para estações de transporte de passageiros. As estações de Faria Guimarães e Heroísmo ultrapassam o valor de TR em dois segundos e meio e três segundos, respetivamente. A estação de Salgueiros é a única com uma diferença menor que um segundo do limite regulamentar. Este incumprimento do regulamento poderia ter justificação no facto de esta exigência para o TR ter sido introduzida depois da entrada em vigor, a 11 de Maio, do Decreto-Lei n.º 129/2002 que aprovou o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). A esta data, já teria sido executado o projeto para as estações em estudo, cujas datas de inauguração são: Faria Guimarães e Salgueiros – 17/09/2005 e Heroísmo – 05/06/2004. No entanto, foram cedidos pela Metro do Porto, os projetos de acústica das três estações [57-59]. Neles está já mencionada esta exigência para o TR e verifica-se o cumprimento da legislação. A razão para atualmente não se verificar o cumprimento dos requisitos estará relacionada com a degradação e consequente perda de eficácia ao longo dos anos do material acústico aplicado nas estações.

6.4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM OUTRAS ESTAÇÕES

A comparação dos valores obtidos com valores de outras estações é fundamental para melhor entender o comportamento acústico das estações de metro estudadas nesta dissertação. Com recurso a dados de vários artigos científicos foi feita uma comparação para alguns parâmetros acústicos medidos para as estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros.

No Quadro 6.19 estão apresentados os valores do nível sonoro equivalente de várias medições efetuadas em diferentes cidades e sistemas de trânsito. São apresentados valores obtidos para o sistema de Nova Iorque em estruturas subterrâneas e de superfície, também para os dois tipos de estruturas (subterrâneas e elevadas) são apresentados valores do sistema de Chicago. Para a cidade de São Francisco são apresentados valores de ruído de fundo dos sistemas de ventilação. Ainda no Quadro 6.19 são expostos valores médios de ruído de fundo em plataformas subterrâneas, carruagens subterrâneas e paragens de autocarro do sistema de Nova Iorque. Posteriormente apenas para estações subterrâneas, são apresentados valores de L_{Aeq} da estação de *St. John's Wood* em Londres, *Sogutozu* e *Bilkent* em Ancara, *Xingzhong Road* em Xangai e os valores medidos no âmbito desta dissertação nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros.

Foi feita também a comparação do ruído de fundo apenas para a situação com a passagem de comboio. Para tal estão representados na Fig. 6.25 os valores de ruído de fundo com passagem de comboio medidos em Chicago, Nova Iorque, Londres, Ancara, Xangai e no caso de estudo do Metro do Porto. Os valores medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros podem ser considerados bons em comparação com as outras medições, sendo que duas das estações (Salgueiros e Faria Guimarães) estão entre os três valores mais favoráveis, apenas a estação de *Xingzhong Road* em Xangai apresenta um valor mais baixo (69,4) dB.

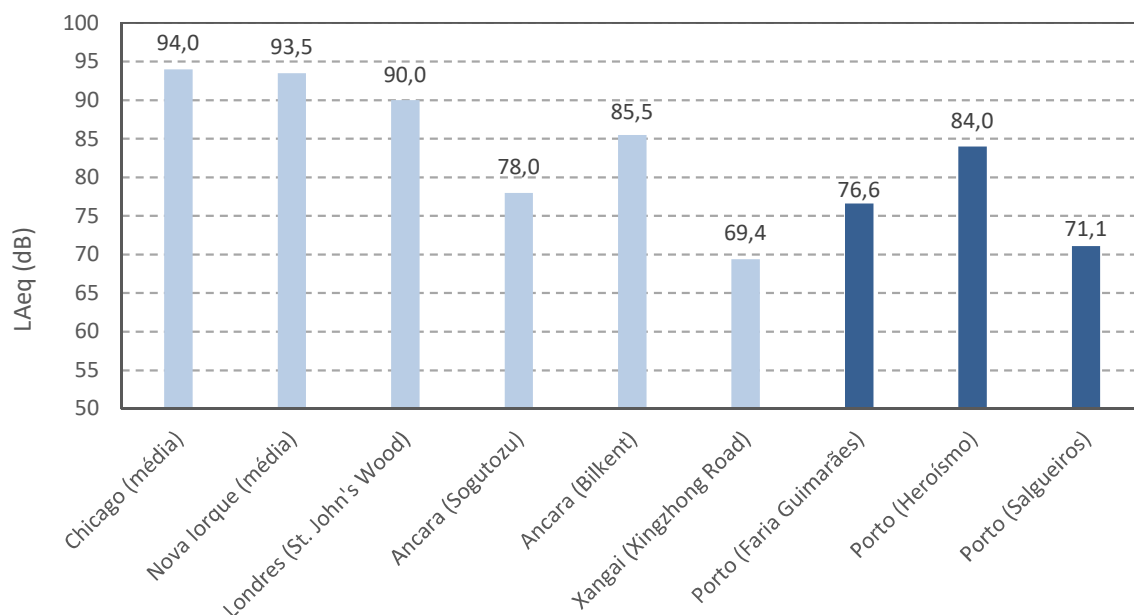


Fig. 6.25 - Comparação de valores de L_{Aeq} (durante a passagem de comboio) de outras estações com os valores medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros

A inteligibilidade da palavra foi também comparada, no Quadro 6.20 estão apresentados, para além dos valores de RASTI medidos para as três estações em estudo (Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros), valores de STI para as estações de *Sogutozu*, *Bilkent* e *ODTU* do metro de Ancara e valores de STI para uma estação típica em Londres, com a particularidade dos dois valores medidos serem para humidades relativas diferentes (50% e 20%). São referidos também valores de SIL numa estação típica de Toronto e do *Speech Transmission Index for Public Address Systems* (STIPA) para dezassete estações do sistema de transporte de Estocolmo. Os valores do STIPA são aproximadamente equivalentes aos do RASTI, seguindo a mesma classificação da inteligibilidade. Para as estações de Estocolmo todos os valores à exceção de um estão qualificados como “Bons”, ou seja, bastante superiores à qualificação de “Aceitável” das estações Faria Guimarães e Heroísmo, e “Pobre” da estação de Salgueiros.

A comparação do tempo de reverberação (Quadro 6.21) é feita para as estações de *Sogutozu*, *Bilkent* e *ODTU*, pertencentes ao sistema de Metro de Ancara (63-8k Hz), para uma estação pertencente ao *Bay Area Rapid Transit System* (BART) em São Francisco com valores do tempo de reverberação (125-8k Hz) antes e depois de tratamento acústico, para uma estação típica da cidade de Hong Kong no Japão (500-1k Hz), para uma estação típica do metro de Londres (125-8k Hz) em que as medições foram efetuadas com diferentes humidades relativas (50% e 20%) e para as estações três estações do caso de estudo desta dissertação (400-2,5k Hz).

Pela análise do Quadro 6.21 e tendo em consideração que os valores de TR apresentados foram medidos para espectros de frequência diferentes, é possível notar que os valores de TR das estações portuguesas são superiores a todos os outros valores recolhidos para esta comparação. A diferença entre o pior resultado estrangeiro (Hong Kong 3,4 segundos) e o pior resultado do metro do Porto (Heroísmo 5,7 segundos) é de 2,3 segundos.

Em comparação com os valores recolhidos de outros locais, de forma geral é possível afirmar que as três estações analisadas nesta dissertação têm um comportamento acústico inferior. Apesar dos valores de ruído de fundo serem razoáveis e até ligeiramente melhores que algumas estações, os valores de RASTI são bastante inferiores transparecendo uma inteligibilidade fraca e os valores de TR são superiores em cerca de 2 a 3 segundos, sendo que valores altos de TR em espaços como as estações de metro subterrâneas são desfavoráveis para o bom funcionamento acústico do espaço.

Quadro 6.19 - Comparação de valores de Ruído de Fundo de vários países com os valores medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros

Cidade	Descrição da Medição		Nível de Pressão Sonora Médio (dB)
Nova Iorque (EUA)	Tipo A – <i>Old type, single shell, steel car</i> (Ambiente aberto) – medição no Exterior		90,5
	Tipo B – <i>Modern, insulated double shell, steel car</i> (Ambiente aberto)	Interior: Janelas abertas	82,5
		Janelas fechadas	77,5
	Tipo C – <i>New type, insulated double shell, steel car</i> (Ambiente aberto)	Exterior	87,0
		Interior: Janelas abertas	86,5
		Janelas fechadas	82,5
	Tipo D – <i>Insulated double shell, articulated steel car sections</i> (Ambiente aberto)	Exterior	84,0
		Interior: Janelas abertas	80,0
		Janelas fechadas	75,0
	Média dos Níveis de Pressão Sonora medidos para diferentes tipos de Estruturas	Exterior	86,5
		Elevadas	88,2
Chicago (EUA)	Linhas Elevadas	Subterrâneas	94,3
		Dentro das carruagens, para espectro completo	85
		Dentro das carruagens - 400-800 Hz	68
		Na proximidade das carruagens - espectro completo	78
	Linhas Subterrâneas	Na proximidade das carruagens - 400-800 Hz	66
		Dentro das carruagens - completo	95
		Dentro das carruagens - 400 – 800 Hz	91
	Linhas Subterrâneas	Proximidade das carruagens - espectro completo	94

		Proximidade das carruagens - 400 – 800 Hz	87	
São Francisco (EUA) (<i>Bay Area Rapid Transit System</i>)	Ruído de fundo do sistema de ventilação (antes / depois) de tratamento acústico	grade de saída de ar	92	93
		sala das ventoinhas	104	105
		ponta sul da plataforma	94	90
		a 30 m da ponta sul da plataforma	89	80
		centro da plataforma	81	66
Nova Iorque (EUA)	Média de 57 medições em Plataformas Subterrâneas		93,5	
	Média de 25 medições dentro de Carruagens Subterrâneas		94,9	
	Média de 10 medições em Paragens de Autocarro		84,1	
Londres (Reino Unido)	Medições na estação de <i>St. John's Wood</i>	Comboio parado	85,0	
		Entrada/Saída Comboio	95,0	
		Sem comboio	60,0	
Ancara (Turquia)	com passagem de comboio na <i>estação Sogutozu</i>		78	
	com passagem de comboio na <i>estação Bilkent</i>		85,5	
Xangai (China)	com o comboio a entrar na estação de <i>Xingzhong Road</i>		69,6	
	com o comboio a sair na estação de <i>Xingzhong Road</i>		69,1	
Faria Guimarães	Ponto 1 sem comboio		47,6	
	com comboio		76,6	
	Ponto 2 sem comboio		58,4	
Heroísmo	Ponto 1 sem comboio		57,1	
	Ponto 1 com comboio na linha + próxima na linha + afastada		84,0	83,5
	Ponto 2 sem comboio		62,1	
Salgueiros	Ponto 1 sem comboio		52,7	
	com comboio		71,1	
	Ponto 1 com dois comboios		75,1	
	Ponto 2 sem comboio		56,0	

Quadro 6.20 - Comparação de valores de parâmetros de inteligibilidade para estações de vários países com os valores de RASTI das estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros

Cidade	Estação	Medição	Valor
Ancara (Turquia)	Sogutozu	STI	0,79
	Bilkent		0,56
	ODTU		0,73
Toronto (Canadá)	Estação típica	SIL - Na plataforma da estação com o comboio a chegar	70-75
Londres (Reino Unido)	Estação típica	STI - 20°C - HR50%	0,43
		HR20%	0,48
Estocolmo (Suécia)	Kungsträdgården	STIPA	0,60
	Fridhemsplan		0,61
	Stadshagen		0,63
	Rådhuset		0,59
	Västra skogen		0,63
	Huvudsta		0,61
	Vreten		0,60
	Sundbyberg		0,62
	Duvbo		0,58
	Rissne		0,63
	Rinkeby		0,64
	Hjulsta		0,61
	Solna		0,63
	Nackrosen		0,64
	Hallonbergen		0,66
	Husby		0,64
	Akalla		0,61
Londres (Reino Unido)	St. John's Wood	STI - Comboio parado	0,1
		Entrada/saída do comboio	0
		Sem comboio	0,5
Porto (Portugal)	Faria Guimarães	RASTI	0,38
	Heroísmo		0,32
	Salgueiros		0,55

Quadro 6.21 - Comparação de valores de Tempo de Reverberação para estações de vários países com os valores de TR medidos nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros

Cidade	Estação	Medição	TR (s)	
<i>Ancara</i> (Turquia)	<i>Sogutozu</i>	(63 - 8k Hz)	1,3	
	<i>Bilkent</i>		1,0	
	<i>ODTU</i>		1,3	
<i>São Francisco</i> (EUA)	Estação da BART (Antes/Depois) Do tratamento	(125 - 8k Hz)	7,4	1,4
<i>Hong Kong</i> (Japão)	Estação típica	(500 - 1k Hz)	3,4	
<i>Londres</i> (Reino Unido)	Estação típica Simulação do TR30 20°C	(125 - 8k Hz)		
		HR50%	2,4	
		HR20%	2,2	
Porto (Portugal)	Faria Guimarães	TR Médio (400-2,5 Hz)	4,9	
	Heroísmo	TR Médio (400-2,5k Hz)	5,7	
	Salgueiros	TR Médio (400-2,5k Hz)	3,3	

7

**CONCLUSÕES E
DESENVOLVIMENTOS FUTUROS****7.1. CONCLUSÕES**

As principais preocupações acústicas no contexto das estações de metro subterrâneas são: controlo do ruído dos veículos que circulam nas linhas, pois estes são a principal fonte de ruído, sendo um incómodo e a partir de certo ponto um perigo para os utilizadores da estação, para os passageiros do metro e principalmente para os trabalhadores das estações e operadores dos veículos, pois estes últimos estão expostos ao ruído do comboio durante um grande espaço de tempo; controlo do ruído de fundo provocado pelos equipamentos técnicos da estação, como os sistemas de ventilação, elevadores e escadas rolantes; assegurar que a arquitetura da estação, nas vertentes de forma e materiais, permite para os utilizadores das estações uma boa inteligibilidade da palavra, não só para possíveis conversas entre utentes mas fundamentalmente para a ótima compreensão dos sistemas públicos de avisos, para que sejam compreendidas as informações sobre as chegadas e partidas dos comboios, assim como os avisos em situações de emergência.

As estações do Metro do Porto analisadas neste trabalho foram as estações de Faria Guimarães e Salgueiros e a estação de Heroísmo. Nestas estações situadas no Porto foram medidos três parâmetros acústicos: O Ruído de Fundo, o RASTI, e o Tempo de Reverberação. O resumo dos valores medidos pode ser observado no Quadro 7.1.

O Ruído de Fundo foi medido para três situações comuns nas três estações. No ponto 1 sem nenhum comboio a passar, no ponto 1 com a passagem do comboio na estação e no ponto 2 sem a passagem de nenhum comboio. Como seria de esperar, as medições que incluem a passagem de veículos na plataforma apresentam valores superiores em 18,4 a 29 dB. No entanto a diferença mais merecedora de comentário é a verificada entre os valores medidos sem veículos para o ponto 1 e para o ponto 2.

Estes dois pontos estavam localizados na plataforma de embarque, o pt.1 junto à linha e o pt.2 na zona de acesso à plataforma, este segundo apresenta valores de L_{Aeq} 3,3 a 10,8 dB superiores aos valores do ponto 1. Isto deve-se à existência de escadas rolantes na zona de acesso à plataforma, que apesar de funcionarem de forma intermitente têm uma grande influência no ruído de fundo sentido na plataforma.

Quadro 7.1 - Tabela resumo das medições efetuadas nas estações de Faria Guimarães, Heroísmo e Salgueiros para os parâmetros acústicos TR, RASTI e Ruído de Fundo

para os parâmetros acústicos TR, RASTI e Ruído de Fundo				
Ruído de Fundo L _{Aeq} (dB)	Pt.1 sem comboio	Pt.1 com comboio	ΔL	Pt.2 sem comboio
Faria Guimarães	47,6	76,6	13,0	58,4
Heroísmo	57,1	84,0		62,1
Salgueiros	52,7	71,1		56,0
RASTI	Média			ΔRASTI
Faria Guimarães	0,38			0,23
Heroísmo	0,32			
Salgueiros	0,55			
Tempo de Reverberação (s)	Média (400-2,5k Hz)			ΔTR
Faria Guimarães	4,9			2,4
Heroísmo	5,7			
Salgueiros	3,3			

Em relação ao parâmetro RASTI é de notar o mau comportamento acústico para duas das estações. A estação de Faria Guimarães e a de Heroísmo, com valores de 0,38 e 0,32 respetivamente, têm uma classificação *Pobre* no que toca à inteligibilidade da palavra. A estação de Salgueiros tem um valor de 0,55, sendo que a inteligibilidade desta é *Aceitável*. Existe uma diferença de 0,23 entre a estação de Heroísmo e Salgueiros, respetivamente a pior e a melhor a nível da inteligibilidade. Com as medições efetuadas foi possível notar para todas as estações uma pior inteligibilidade nas zonas junto à parede lateral da plataforma e em contraste uma melhor inteligibilidade nas zonas junto à linha. Traduzindo isto para uma situação real, os utilizadores das estações de metro conseguirão ouvir e entender melhor os discursos emitidos quando junto à linha e pior se sentados nos bancos ou encostados à parede. Foi também possível perceber a forte ligação entre o RASTI e o TR, as estações com valores mais baixos de TR apresentam um melhor valor de RASTI. Esta relação acontece, pois, o encurtamento do rasto sonoro, que é provocado pelas sucessivas reflexões do som direto, faz com que a informação sonora original sofra menos perturbações e, portanto, seja mais facilmente compreendida pelo recetor.

Através da análise dos resultados do tempo de reverberação é possível concluir que a estação de Salgueiros é que tem melhor desempenho, sendo que apresenta um valor médio de 3,3 segundos, valor consideravelmente inferior aos das estações de Faria Guimarães e Heroísmo, com 4,9 e 5,7 segundos respetivamente, a diferença de TR entre a melhor estação e a pior é de 2,4 segundos. A medição por bandas de 1/3 de oitava permitiu perceber que o tempo de reverberação para as frequências baixas é bastante alto, por se tratarem de ondas sonoras com grande comprimento de onda e que para a outra extremidade do espectro, nas frequências altas, o tempo de reverberação é baixo, pois as ondas de alta frequência são fortemente atenuadas pelo ar existente no grande volume da estação.

É de referir o incumprimento dos valores do R.R.A.E. para o valor de tempo de reverberação em estações de transporte de passageiros. Nenhuma das três estações de metro cumpre os requisitos atuais do TR. A única estação que se aproxima do valor é a estação de Salgueiros, com uma diferença inferior a 1 segundo. As outras duas estações analisadas, Faria Guimarães e Heroísmo, têm uma diferença para o

TR regulamentar de 2,3 e 3,0 segundos respetivamente. Como já referido, o projeto das estações terá sido executado previamente à entrada em vigor, a 11 de Maio, do Decreto-Lei n.º 129/2002 que aprovou o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), no entanto este é já referido nos projetos de acústica das três estações onde se verifica o seu cumprimento. Através de informações discutidas em reunião, conclui-se que o incumprimento atual do regulamento estará relacionado com a degradação dos materiais acústicos aplicados, que ao longo dos anos vão perdendo a sua capacidade de absorver ondas sonoras.

A diferença acentuada entre os tempos de reverberação das estações e o facto de possuírem geometrias em planta tão semelhantes incentivaram o estudo da relação entre o tempo de reverberação e a arquitetura do espaço. Foi possível concluir, nesta pequena amostra de três estações, que os valores de tempo de reverberação estão relacionados com a quantidade de tratamento acústico aplicado na estação. Na intervenção acústica executada nas estações do Metro do Porto foi aplicado teto acústico. A estação de Salgueiros que é a que tem maior área de teto acústico é também a que possui menor tempo de reverberação, o oposto acontece para a estação de Heroísmo, que tem a menor área de teto acústico aplicado e por sua vez tem o maior tempo de reverberação. A estação de Faria Guimarães encontra-se na situação intermédia. Na Fig. 7.1 é possível observar o gráfico que relaciona o TR médio (400-2500 Hz) com a área de teto acústico aplicada na plataforma de embarque das estações. A correlação efetuada apresenta um valor de R^2 de 0,98.

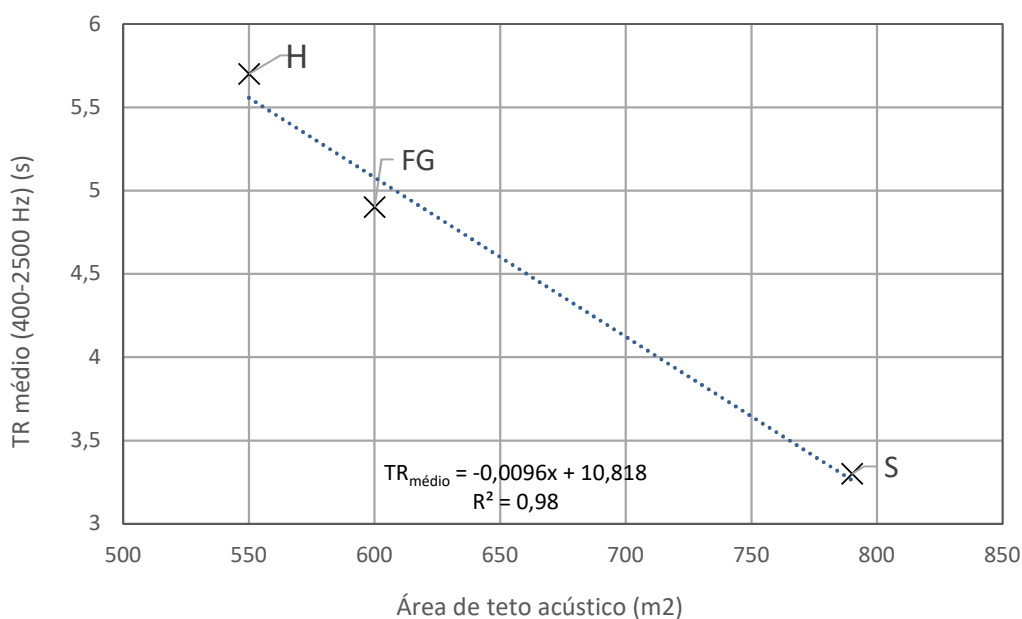


Fig. 7.1 - Relação entre o TR médio (400-2500 Hz) e as áreas de teto acústico para as três estações (FG - Faria Guimarães, H - Heroísmo, S - Salgueiros)

Uma vez que o tempo de reverberação é tão condicionante para a inteligibilidade da palavra, pode também relacionar-se os valores de RASTI com a quantidade de teto acústico aplicado. À semelhança do TR, a estação de Salgueiros é a que possui melhores valores para o RASTI e a de Heroísmo é que tem os valores mais baixos.

A visão geral que fica desta medição e caracterização das três estações de metro é que a estação de Salgueiros, por ter maior área de teto acústico aplicado, é claramente a que possui melhores condições

acústicas, apresentando os melhores valores para os três parâmetros estudados. Segue-se a estação de Faria Guimarães, com os segundos melhores valores para todos os parâmetros. A estação de metro com pior comportamento acústico é a de Heroísmo, sendo que apresenta os piores valores para os três parâmetros acústicos analisados. A quantidade de tratamento acústico aplicado, graças ao seu efeito atenuante nas ondas sonoras, é determinante para melhorar as características acústicas das estações, e é neste caso de estudo o principal fator para a diferença de condições acústicas sentida nas três estações.

Em comparação com estações de outros países, é possível concluir que as estações do Metro do Porto possuem condições acústicas ligeiramente inferiores. O único ponto forte das três estações portuguesas são os valores de ruído de fundo, que são dos mais baixos da comparação feita no capítulo 6. O baixo ruído de fundo pode estar relacionado com o facto das estações em estudo serem relativamente recentes em comparação com outras estações (H – 2004 / FG e S – 2005), tendo em circulação veículos mais modernos e equipamentos em melhor estado de manutenção.

No que diz respeito aos outros dois parâmetros em estudo, RASTI e TR, os valores obtidos para as estações em estudo são dos mais desfavoráveis em comparação com valores de outros países. Para o TR, o melhor valor português, medido na estação de Salgueiros (3,3 s) difere apenas de 0,1 segundos do pior valor de TR recolhido para a comparação (Hong Kong – 3,4 s). Se a comparação for feita entre o melhor valor recolhido de outros países e o pior valor medido no metro do Porto, a diferença chega aos 4,7 segundos (Heroísmo – 5,7 s / *Bilkent* – 1,0 s).

Quanto aos valores do RASTI, das estações portuguesas em estudo, duas delas (Heroísmo – 0,32 e Faria Guimarães – 0,38) fazem parte das três piores estações em termos de inteligibilidade dos dados recolhidos para a comparação do capítulo 6.

Os fracos valores de TR e RASTI são indicativos de que as estações portuguesas tiveram um tratamento acústico débil, os revestimentos são em grande parte muito refletores e existe pouca atenuação das ondas sonoras. Uma intervenção acústica mais forte, com aplicação de maior área de revestimentos acústicos, seria decerto capaz de baixar consideravelmente os valores de TR e por conseguinte melhorar a inteligibilidade da palavra, tão importante para os utilizadores das estações de metro.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Depois de concluída esta dissertação que teve como caso de estudo o Metro do Porto, alguns tópicos de desenvolvimento posterior poderão passar por:

- Caracterizar acusticamente as restantes estações não escolhidas para análise nesta dissertação, de modo a obter uma visão geral de todas as estações subterrâneas do Metro do Porto. Esta análise permitiria tirar melhores conclusões sobre a influência do volume e forma do espaço nos parâmetros acústicos.
- Aprofundar o estudo da inteligibilidade da palavra nas estações de metro, através de medições de parâmetros objetivos, distintos do RASTI utilizado nesta dissertação, como o STIPA e também fazendo a medição de alguns parâmetros subjetivos relacionados com a inteligibilidade do discurso.
- Com recurso a *softwares* de modelação acústica, simular e prever valores de parâmetros acústicos para estações existentes e aplicar alterações às características dos materiais de forma a prever os ganhos de possíveis intervenções.
- Em parceria com o Metro do Porto, que durante as reuniões para esta tese pareceu interessado em melhorar as condições das suas estações, fazer o estudo de uma possível intervenção acústica nas estações, uma vez que as últimas e únicas intervenções acústicas realizadas nas estações foram há mais de dez anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. P. O. Carvalho, *Acústica Ambiental e de Edifícios*, FEUP, ed. 8.13, 2017.
- [2] T. A. Everest e K. C. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, ed. 5, 2001.
- [3] Infopedia. *Dicionário da Língua Portuguesa, metropolitano*. <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/metropolitano>. Acedido em 20/03/2018.
- [4] J. R. Day e J. Reed, *The Story of London's Underground*, Londres: Capital Transport, ed. 8, 2001.
- [5] The Guardian. *A Short History of World Metro Systems – in pictures*. <https://www.theguardian.com/cities/gallery/2014/sep/10/-sp-history-metro-pictures-london-underground-new-york-beijing-seoul>. Acedido em 26/03/2018.
- [6] World Atlas. *The World's Oldest Metro Systems*. <https://www.worldatlas.com/articles/the-world-s-oldest-metro-systems.html>. Acedido em 19/03/2018.
- [7] Público. *Metro Mondego*. <https://www.publico.pt/metro-mondego>. Acedido em 20/03/2018.
- [8] China Daily. *Travel - Riding the Rails*. http://www.chinadaily.com.cn/travel/2013-04/22/content_16430877.htm. Acedido em 19/03/2018.
- [9] Tokyo Metro. *Station Ikebukuro*. https://www.tokymetro.jp/lang_en/station/ikebukuro/index.html. Acedido em 21/03/2018.
- [10] Wikipédia. *Gare du Nord (Paris Métro)*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Gare_du_Nord_\(Paris_Métro\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gare_du_Nord_(Paris_Métro)). Acedido em 21/03/2018.
- [11] M. Long, *Architectural Acoustics*, Elsevier, 2006.
- [12] L. Tronchin, "The 'Phonurgia Nova' of Athanasius Kircher: The Marvellous sound world of 17th century", *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 4, (1), pp. 015002, 2008.
- [13] Hearing Review. *Back to Basics: Wallace Sabine, Music Halls, and Reverberation Time*. <http://www.hearingreview.com/2016/09/back-basics-wallace-sabine-music-halls-reverberation-time/>. Acedido em 19/03/2018.
- [14] G. T. Stanton e J. E. Tweeddale, "The Noise Survey of the Rapid Transit Lines of New York City", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 3, (3), pp. 371-387, 1932.
- [15] G. Bonvallet, "Levels and spectra of transportation vehicle noise", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22, (2), pp. 201-205, 1950.
- [16] W. H. Paterson e T. D. Northwood, "Noise Control in Toronto's New Subway", *Noise Control*, 2, (5), pp. 28-62, 1956.
- [17] A. G. Konheim e J. S. Ruth, "Passenger noise environments of enclosed transportation systems", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58, (S1), pp. S125, 1975.
- [18] NYC subway. *The PCC Car - Not So Standard*. https://www.nycsubway.org/wiki/The_PCC_Car_-_Not_So_Standard. Acedido em 20/03/2018.

- [19] S. L. Wolfe, "Interior noise measurements on the MBTA Green Line", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60, (S1), pp. S23, 1976.
- [20] Rock Hill Trolley. *New Jersey Transit PCC Car*. <http://www.rockhilltrolley.org/roster/6>. Acedido em 21/03/2018.
- [21] K. Kleinschmidt, "Noise control considerations in the modernization of a Boston subway station", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62, (S1), pp. S70, 1977.
- [22] P. Y. N. Lee, "Noise Control for Fan and Vent Shafts in Subways", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60, (S52), 1978
- [23] W. H. Organization, "Guidelines for Community Noise," outcome of the WHO Expert Task Force Meeting, Londres, 1999.
- [24] R. R. Gershon, R. Neitzel, M. A. Barrera e M. Akram, "Pilot survey of subway and bus stop noise levels", *J Urban Health*, 83, (5), pp. 802-12, 2006.
- [25] N. Castelo Branco e M. Alves-Pereira, "Vibroacoustic disease", *Noise and Health*, Articles 6, (23), pp. 3-20, 2004.
- [26] Y. Altay, "Planning considerations for underground train stations," Bilkent Univ. Turquia, 1997.
- [27] S. Durmisevic e S. Sariyildiz, "A systematic quality assessment of underground spaces—public transport stations", *Cities*, 18, (1), pp. 13-23, 2001.
- [28] S. Durmisevic, "The future of the underground space", *Cities*, 16, (4), pp. 233-245, 1999.
- [29] J. Kang, "A method for predicting acoustic indices in long enclosures", *Applied Acoustics*, 51, (2), pp. 169-180, 1997.
- [30] J. Kang, "Scale modelling of train noise propagation in an underground station," ed: Elsevier, 1997.
- [31] J. Kang, "Acoustics of long underground spaces", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12, (1), pp. 15-21, 1997.
- [32] P. Lam e K. Li, "The predicted reverberation time in a rectangular long enclosure," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2004, vol. 2004, (3), pp. 3752-3758: Institute of Noise Control Engineering.
- [33] L. Yang e B. M. Shield, "The prediction of speech intelligibility in underground stations of rectangular cross section", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109, (1), pp. 266-273, 2001.
- [34] R. Carman, "Prediction of train noise in tunnels and stations," in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2004, (8), pp. 424-430: Institute of Noise Control Engineering, 2004.
- [35] S. J. van Wijngaarden e J. Verhage, "The influence of fan and traffic noise on speech intelligibility in Dutch traffic tunnels," in *INTER-NOISE 2001- INTERNATIONAL CONGRESS AND EXHIBITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING*, 2001.
- [36] A. R. Crockett e J. Pyke, "Viaduct design for minimization of direct and structure-radiated train noise", *Journal of Sound and Vibration*, 231, (3), pp. 883-897, 2000.
- [37] Z. Sü e M. Çalışkan, "Acoustical design and noise control in metro stations: case studies of the Ankara metro system", *Building Acoustics*, 14, (3), pp. 203-221, 2007.

- [38] L. K. Irvine e R. L. Richards, *Acoustics and noise control handbook for architects and builders*, Krieger Publishing Company Malabar FL, EUA, 1998.
- [39] R. Shimokura e Y. Soeta, "Sound field characteristics of underground railway stations – Effect of interior materials and noise source positions", *Applied Acoustics*, 73, (11), pp. 1150-1158, 2012.
- [40] A. Oldfield, "Acoustic design of transit stations", pp. 015001, 2013.
- [41] P. Zalyaletdinov, "Evaluation of speech intelligibility on subway platforms from horizontally positioned line-array loudspeakers", *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2012, (6), pp. 5892-5900, 2012.
- [42] Y. H. Kim e Y. Soeta, "Architectural treatments for improving sound fields for public address announcements in underground station platforms", *Applied Acoustics*, 74, (11), pp. 1205-1220, 2013.
- [43] Y. H. Kim e Y. Soeta, "Effects of reverberation and spatial diffuseness on the speech intelligibility of public address sounds in subway platform for young and aged people," in *Proceedings of Meetings on Acoustics ICA2013*, vol. 19, (1), p. 050061: ASA, 2013.
- [44] C. H. Tang, Y. S. Wang e H. Guo, "Sound Field Simulation and Optimization at an Underground Subway Station", *Building Acoustics*, 20, (3), pp. 243-253, 2013.
- [45] L. Gomez-Agustina, S. Dance e B. Shield, "The effects of air temperature and humidity on the acoustic design of voice alarm systems on underground stations", *Applied Acoustics*, 76, (pp. 262-273, 2014.
- [46] Normetro, *Metro do Porto projecto, construção, equipamento e operação do sistema de metro ligeiro da área metropolitana do Porto*, Porto, 1999.
- [47] Metro do Porto. Conhecer <https://www.metrodoporto.pt/pages/307>. Acedido em 19/04/2018.
- [48] *Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios - R.R.A.E., Decreto-Lei n.º 110/2008 de 9 de Junho*.
- [49] *Acústica descrição, medição e avaliação do ruído ambiente Parte 1 grandezas fundamentais e métodos de avaliação NP ISO 1996-1: 2011*, 2011.
- [50] *Acústica medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção NP EN ISO 140-7: 2015 Parte 7 Medição, in situ, do isolamento sonoro de pavimentos a sons de percussão (ISO 140-7: 1998), 2ª ed*, 2015.
- [51] *Acústica determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção NP EN ISO 717-1: 2013 Parte 1 isolamento sonoro a sons de condução aérea (ISO 717-1: 2013), 2ª ed*, 2013.
- [52] *Acústica medição de parâmetros de acústica de salas NP EN ISO 3382-2: 2015 Parte 2 Tempo de reverberação em salas correntes (ISO 3382-2: 2008), 2ª ed*, 2015.
- [53] *Acústica medição do nível de pressão sonora de equipamentos de serviço em edifícios método de engenharia (ISO 16032:2004) NP EN ISO 16032: 2009*, 2009.
- [54] Brüel & Kjaer - Type 3361 RASTI Product Data Sheet, 1986.
- [55] STIER - BASWaphon sistema acústico contínuo para tectos e paredes.
- [56] A. P. Gonçalves, comunicação pessoal, 29/05/2018.

[57] Metro do Porto, "Relatório Técnico - Condicionamento Acústico, Projeto de Execução - FARIA GUIMARÃES."

[58] Metro do Porto, "Relatório Técnico - Condicionamento Acústico, Projeto de Execução - HEROÍSMO."

[59] Metro do Porto, "Relatório Técnico - Condicionamento Acústico, Projeto de Execução - SALGUEIROS".